

Aus der Klinik für Radiologie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Simulation von CT-gestützten periradikulären Therapien an
neuartigen anthropomorphen Phantomen – Evaluation von
Simulationstraining und Interventionstechniken

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Victor Braun

aus Berlin

Datum der Promotion: 03.03.2023

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
Abstract (Deutsch)	5
Abstract (Englisch)	7
1. Einführung	9
1.1 Nervenwurzelreizsyndrom und CT-gestützte periradikuläre Therapie	9
1.2 Interventionstechniken bei der PRT	9
1.3 Ausbildungsprinzipien bei der PRT – heute und in Zukunft	11
1.4 Simulatoren in der Medizin – von Schaumstoffblöcken zum 3D-Druck	12
2. Material und Methodik	13
2.1 Entwicklung von CT-Phantomen	13
2.2 PRT-Simulationstraining	14
2.3 Interventionstechnik	15
3. Ergebnisse	17
3.1 Entwicklung von CT-Phantomen	17
3.2 PRT-Simulationstraining	17
3.3 Interventionstechnik	19
4. Diskussion	19
4.1 Zusammenfassende Darstellung	19
4.2 Diskussion und Schlussfolgerungen im Literaturkontext	20
4.3 Limitationen	25
4.4 Zusammenfassende Schlussfolgerung	26
5. Literaturverzeichnis	27
Eidesstattliche Versicherung	32
Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen	33
Druckexemplare der ausgewählten Publikationen	34
Lebenslauf	58
Komplette Publikationsliste	59
Danksagung	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leistungsmetriken aller Teilnehmenden in den drei Trainingssitzungen	18
Tabelle 2: Statistischer Vergleich der Gruppen der in Sitzung 1 schnelleren und langsameren Teilnehmenden	18

Abkürzungsverzeichnis

CT	Computertomographie
CT-Zahl	Computertomographie-Zahl: Aus dem Schwächungskoeffizienten abgeleitete Größe, die die Strahlenschwächung in einem Gewebe beschreibt und deren Einheit die Hounsfield Unit (HU) ist.
G	Engl.: Gauge (Maß für die Größe von Kanülen)
HU	Engl.: Hounsfield Unit (Hounsfield Einheit)
Ln	Spinalnerv, der dem Lendenwirbelsäulensegment n entstammt und direkt unterhalb von Lendenwirbelkörper n den Wirbelkanal verlässt, $n = 1, \dots, 5$.
LWS	Lendenwirbelsäule
MRT	Magnetresonanztomographie
PRT	Periradikuläre Therapie
SD	Engl.: Standard deviation (Standardabweichung)

Zusammenfassung

Abstract (Deutsch)

Einführung:

Die Computertomographie (CT)-gestützte periradikuläre Therapie (PRT) ist ein minimalinvasiver Eingriff zur Therapie des Nervenwurzelreizsyndroms. Bei der Durchführung kommt sicherem und dosissparendem Arbeiten besondere Bedeutung zu. Sowohl zum Erlernen als auch zur Entwicklung von PRT-Techniken können Simulationen eingesetzt werden. Anatomisch realistische Phantome unterstützen dabei die Übertragbarkeit von Simulationsergebnissen in die klinische Anwendung. Daher wurde in dieser Arbeit ein neues, papierbasiertes 3D-Druckverfahren entwickelt, das die Herstellung von Interventionsphantomen ermöglichte. Darauf aufbauend wurden ein realistisches PRT-Simulationstraining und eine innovative PRT-Technik zur Nadelplatzierung anhand von CT-Scout-Bildern entwickelt und evaluiert.

Methodik:

Im ersten Schritt wurde ein neues Verfahren zur Herstellung realistischer Phantome entwickelt. Hierzu wurden CT-Bilder mit kaliumiodidhaltiger Tinte auf Papier gedruckt, das anschließend zu dreidimensionalen Phantomen gestapelt wurde. Auf dieser Grundlage wurden Phantome für CT-gestützte Interventionen hergestellt, die für die nachfolgenden Arbeiten verwendet wurden. Im zweiten Schritt nahmen siebzehn Medizinstudierende an einem Simulationstraining an solchen Phantomen teil. Das Training umfasste drei Einheiten mit jeweils sechs Punktionen. Die Evaluation erfolgte anhand der Durchführungsdauer, Anzahl an CT-Aufnahmen, einer Checkliste und von Fragebögen, die von den Teilnehmern ausgefüllt wurden. Im dritten Schritt wurde ein Verfahren zur Planung und Durchführung von PRTs anhand von CT-Scout-Aufnahmen entwickelt. Zur Evaluation wurden fünfzig Scout-gestützte Punktionen mit zehn in konventioneller Freihandtechnik durchgeführten Punktionen hinsichtlich der Anzahl an CT-Aufnahmen und des Dosislängenprodukts verglichen.

Ergebnisse:

Das neu entwickelte 3D-Druckverfahren lieferte CT-Phantome, die Form, Anatomie und Strahlenschwächungseigenschaften von Patienten realistisch wiedergaben. Das Simulationstraining führte zu einer Verbesserung aller gemessenen Parameter zwischen der ersten und der zweiten Trainingseinheit. Die Interventionsdauer und die Anzahl an Bildaufnahmen blieben in der dritten Trainingssitzung konstant. Allerdings machten die Teilnehmenden mehr Fehler, was durch eine Abnahme der Checklistenpunkte zum Ausdruck kam. In den Fragebögen zeigten sich die Studierenden zuversichtlich, durch das Training gut auf PRTs an Patienten vorbereitet zu sein. Die Scout-gestützte PRT-Technik ermöglichte zuverlässige Nadelplatzierungen bei signifikant weniger CT-Aufnahmen und Dosis als in der Durchführung mit Freihandtechnik.

Schlussfolgerung:

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte 3D-Druckverfahren bildete die Grundlage für realistische patientenspezifische Phantome für diagnostische und interventionelle Anwendungen in der CT. Das Simulationstraining der CT-gestützten PRT war effektiv. Die Ergebnisse wiesen darauf hin, dass eine einzige Trainingseinheit mit fünf Punctionen genügt, um Auszubildende effektiv auf PRTs bei Patienten vorzubereiten. PRTs sind allein auf Grundlage von CT-Scoutbildern durchführbar, wodurch sich die Strahlenexposition wesentlich verringern lässt.

Abstract (Englisch)

Introduction:

Computed tomography (CT)-assisted periradicular therapy (PRT) is a minimally invasive procedure for the treatment of nerve root irritation syndrome. Safety and minimal dose exposure are of importance in performing CT-guided PRTs. Simulations can be used both for training and developing PRT techniques. Anatomically realistic phantoms support the transferability of simulation results into the clinical application. Therefore, in this work, a new paper-based 3D printing method was developed that enabled the production of realistic interventional phantoms. Based on these phantoms, a realistic PRT simulation training and an innovative PRT technique for needle placement using CT scout images were developed and evaluated.

Methods:

In a first step, a new technology was developed for producing realistic phantoms. To this end, CT images were printed on paper using potassium iodide doped ink, which were then stacked to build three-dimensional phantoms. Based on these developments, phantoms were produced for CT-guided interventions, which were used for the subsequent work. In a second step, seventeen medical students participated in a simulation training on such phantoms. The training included three sessions of six punctures per session. Outcome parameters were procedure durations, number of image acquisitions, a checklist score, and questionnaires answered by the participants. In a third step, a procedure for planning and performing PRTs using CT scout images was developed. Fifty scout-guided punctures were compared with ten punctures performed using a conventional freehand technique regarding CT acquisitions and dose length products.

Results:

The newly developed 3D printing technique provided CT phantoms that realistically reproduced patient shape, anatomy, and attenuation characteristics. The simulation training resulted in improvement of all measured parameters between the first and second training sessions. Procedure durations and image acquisitions remained constant in the third session. However, participants made more errors, as reflected by a decrease in checklist scores. The questionnaires showed that the participants considered themselves well prepared for PRTs on patients after the training. The scout-guided PRT technique enabled reliable needle placements and required significantly fewer CT acquisitions and lower doses than with the freehand technique.

Conclusion:

The 3D printing technology developed in this work provides realistic patient-specific phantoms for diagnostic and interventional applications in CT. The simulation training of CT-guided PRTs was effective. The results indicated that a single training session with five punctures is sufficient to effectively prepare trainees for PRTs on patients. PRTs can be performed based on CT scout images alone, which can significantly reduce radiation exposure.

1. Einführung

1.1 Nervenwurzelreizsyndrom und CT-gestützte periradikuläre Therapie

Schätzungen zufolge begeben sich bis zu 80 % der Bevölkerung in den westlichen Industrienationen mindestens einmal in ihrem Leben aufgrund von Wirbelsäulenschmerzen in ärztliche Behandlung (1). Die Prävalenz chronischer Rückenschmerzen wird auf bis zu 20% geschätzt (2). Rückenschmerzen verursachen durch die Behandlungskosten und durch den Verlust des Arbeitsvermögens und damit einhergehende Belastungen der Sozialversicherungen enorme Kosten für die Gesellschaft (3). Die Ursachen für Rückenschmerzen sind vielfältig. Eine Ursache ist das Nervenwurzelreizsyndrom. Dieses bezeichnet die mechanische Einengung der Nervenwurzel an ihrem Austrittspunkt aus der Wirbelsäule mit dadurch bedingter Entzündung und Ödem der Nervenwurzel. Zu den häufigen Ursachen einer Einengung der Nervenwurzel gehören Bandscheibenvorfälle und degenerative Veränderungen wie die hypertrophe Spondylarthrose (1). Die therapeutischen Optionen umfassen konservative Maßnahmen wie die Physiotherapie sowie operative Eingriffe mit dem Ziel, die Nervenwurzel zu entlasten. Eine weitere Therapieform ist die Applikation eines Lokalanästhetikums und eines Glukokortikoids an der Nervenwurzel durch eine dort platzierte Punktionsnadel. Dieses Vorgehen wird als periradikuläre Therapie (PRT) bezeichnet. Die Schmerzreduktion bei geringen Nebenwirkungen ist für diese Therapieform gut belegt (3). Das Glukokortikoid wirkt antientzündlich und abschwellend (4). Das Lokalanästhetikum reduziert durch die Repolarisation der Nervenfasern mit Blockierung der Kalium-Natrium-Kanäle die nervale Irritation und erhöht die Schmerzschwelle (1). Um eine sichere Platzierung der Nadel an der Nervenwurzel zu gewährleisten, können bildgebende Verfahren wie die Computertomographie (CT) genutzt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die CT-gestützte PRT einer allein an tastbaren anatomischen Strukturen orientierten Technik überlegen und zugleich kosteneffizienter als die MRT-gestützte PRT ist (5, 6).

1.2 Interventionstechniken bei der PRT

Der Ablauf einer CT-gestützten lumbalen PRT, wie er in unserer Klinik durchgeführt wird, umfasst im Wesentlichen das Anfertigen einer Spiral-CT anhand derer der Eingriff an der Konsole geplant wird, das Platzieren der Nadel unter CT-fluoroskopischer Kontrolle und abschließend die Applikation des Therapeutikums. Der detaillierte Ablauf wird im

Folgenden geschildert. Zunächst wird die Indikation gestellt und der Patient oder die Patientin aufgeklärt. Danach wird der Patient oder die Patientin in Bauchlage auf dem CT-Tisch positioniert. Ein Draht wird längs zur Wirbelsäule auf die Haut geklebt, um später in den Schnittbildern als Bezugspunkt zu dienen und so genauere Messungen zu ermöglichen. Ein lateraler und ein anteroposteriorer Scout werden angefertigt, bei denen es sich um zweidimensionale Projektionsbilder handelt. In manchen Kliniken wird nur ein lateraler Scout angefertigt, sodass die anteroposteriore Aufnahme als fakultativ gelten kann. Die Zielsegmente der LWS werden identifiziert. Ein Spiral-CT des entsprechenden Abschnitts wird angefertigt und es werden dünn-schichtige Bilder rekonstruiert. Es wird ein paravertebraler Nadeleinstichpunkt gewählt und der Einstichwinkel und die Einstichtiefe sowie die Distanz zur Drahtmarkierung in den Planungsbildern abgemessen. Die Punktionsstelle wird auf der Haut markiert und danach wird der Draht wieder von der Haut entfernt. Der Radiologe wäscht und desinfiziert sich die Hände und kleidet sich mit OP-Haube und -Maske sowie sterilen Handschuhen ein. Die Haut wird desinfiziert und mit einer gefensterten sterilen Abdeckung bedeckt. Es erfolgt eine Lokalanästhesie der Haut und Muskulatur, z.B. mittels Lidocain 1,0 %. Ausgehend vom Planungsbild wird dann CT-gestützt eine Spinalkanüle am Neuroforamen, dem Austrittspunkt des Spinalnerven aus der Wirbelsäule, platziert. Hierfür kommen z.B. Spinalkanülen zwischen 20 und 22 G von 10 oder 15 cm Länge je nach Patienten-anatomie zum Einsatz. In unserer Klinik wird häufig mit 21 G Chiba-Nadeln gearbeitet. Daraufhin wird das Therapeutikum appliziert. Es enthält 1 ml Triamcinolonacetomid (40 mg) sowie 2 ml Bupivacain 0,5 %. In unserer Klinik erfolgt standardmäßig keine Applikation von Kontrastmittel vor Verabreichung des Therapeutikums. Diese wird in manchen Kliniken zur Verifikation der korrekten periradikulären Lage durchgeführt (1, 7).

Wie bei allen invasiven Verfahren spielt bei der PRT die Qualität der Durchführung eine wichtige Rolle, um Wirksamkeit zu gewährleisten und unerwünschte Effekte wie Verletzungen der Nervenwurzel zu vermeiden. Da bei der CT ionisierende Strahlung zum Einsatz kommt, ist bei der CT-gestützten PRT auch der Strahlenschutz wesentlich. Die Strahlendosis, welche im Rahmen der Intervention appliziert wird, setzt sich zusammen aus den Dosen des Scouts, der initialen Spiral-CT sowie der Fluoroskopie- bzw. Kontrollbilder. Die Positionierung der Nadel an der Nervenwurzel kann unter kontinuierlicher CT-fluoroskopischer Echtzeit-Kontrolle geschehen, sodass eine Echtzeit-Visualisierung von Richtung und Verlauf der Nadel gegeben ist. Diese Technik ist jedoch

mit einer höheren Strahlenbelastung von Patienten und radiologischem Personal verbunden. Verbreiteter ist die nicht-kontinuierliche CT-Fluoroskopie, eine sequentielle Technik, bei der der Radiologe die Nadel vorbewegt und bei der Anfertigung fluoroskopischer Einzelaufnahmen außerhalb des CT-Raumes steht (8). Hierbei hat der Radiologe keinen visuellen Abgleich in Echtzeit. Diese Technik setzt also das Abschätzen des Winkels und der Tiefe voraus. Ein vorsichtiges Vorgehen mit kleinen Vorschüben und vielen Kontrollbildern erhöht zwar die Sicherheit, zugleich aber auch den Zeitaufwand und die Dosis. Meist wird die Navigation der Nadel in einer sogenannten Freihandtechnik durchgeführt, das heißt, der Radiologe nutzt allein sein Abschätzungsvermögen, um die richtigen Winkel zu wählen (8).

Es gibt verschiedene technische Möglichkeiten, die Orientierung bei der Durchführung CT-gestützter Interventionen zu vereinfachen. Nicht selten gehen diese jedoch mit einer höheren Strahlendosis einher. Eine einfache Möglichkeit ist es, pro Scan statt eines einzelnen Bildes in einer Ebene (Single-shot-Technik) mehrere Bilder in angrenzenden Ebenen (Multiple-shot-Technik) anzufertigen und damit einen größeren Interventionsbereich in z-Richtung abzudecken. Dies hat den Vorteil, dass die Richtung des Abweichens der Nadel in der z-Achse direkt erkannt und die Nadelspitze somit einfacher eingestellt werden kann (8). Jedoch geht dieses Vorgehen mit einer entsprechend höheren Dosis einher. Assistenzsysteme wie lasergestützte Systeme (9, 10) oder elektromagnetisches Tracking (11, 12) geben dem Radiologen den geplanten Punktionsweg vor, setzen jedoch die Durchführung eines Spiral-CTs zur Planung voraus. In dieser Arbeit wird ein Vorgehen vorgestellt, welches ähnlich einfach durchgeführt werden kann, die Standardausrüstung nutzt und zugleich die Strahlenbelastung verringert.

1.3 Ausbildungsprinzipien bei der PRT – heute und in Zukunft

Da jeder Anfänger erst eine Lernkurve durchlaufen muss, stellt sich die Frage, wie die Fertigkeiten zur Durchführung der PRT effektiv und patientengerecht erlernt und gelehrt werden können. Das in der klinischen Praxis am häufigsten angewandte Modell zum Vermitteln einer Fertigkeit wie der Durchführung der PRT wird in der englischen Literatur als „apprenticeship model“ (Ausbildungsmodell) bezeichnet. Dabei werden die Auszubildenden von der Beobachtung über die assistierende Teilnahme und über die supervidierte Ausführung hin zur unabhängigen Durchführung geleitet (13). Dieser

Lernprozess findet jedoch direkt an Patienten statt, was zunehmend als problematisch empfunden wird, da diese hierdurch einem unnötig hohen Risiko ausgesetzt werden könnten (14). Einige Quellen empfehlen daher, dieses Ausbildungsprinzip um Simulationen zu erweitern (15, 16). Unter Simulation versteht man in der Medizin eine Technik, bei der Probleme, Ereignisse oder Bedingungen des professionellen medizinischen Umfelds künstlich nachgebildet werden (17, 18). Konge et al. argumentieren in einer Arbeit von 2015, dass Simulationen es ermöglichen, die frühe Lernkurve, die durch Unsicherheit sowie langsamere und potentiell risikoreichere Durchführung geprägt ist, in die geschützte Lernumgebung der Simulation zu übertragen. Ein Anfänger würde dann beim ersten Eingriff am Patienten bereits Vorerfahrung aufweisen. Zugleich wird darauf hingewiesen, dass das maximale Leistungsniveau erst in der Durchführung an Patienten erreicht werden kann, da die Simulation die Realität nie vollständig abbilden kann (19). Simulation hat sich in der Medizin in vielen Feldern als hilfreiche Erweiterung im Rahmen der Aneignung von Fertigkeiten erwiesen, besonders in den Fachgebieten Anästhesie (20) und Chirurgie (21).

1.4 Simulatoren in der Medizin – von Schaumstoffblöcken zum 3D-Druck

In der Medizin werden Simulatoren eingesetzt, um klinische Szenarien zu simulieren, beispielsweise indem Anatomie, Körperfunktionen oder Strahlenschwächungseigenschaften des Menschen imitiert werden. Für CT-gestützte Interventionen werden Simulatoren jedoch noch vergleichsweise wenig eingesetzt, wohingegen für andere Bereiche wie vaskuläre Eingriffe bereits umfangreiche Daten vorliegen (15, 17, 22). Dass sich Simulatoren bei CT-gestützten Interventionen noch nicht durchgesetzt haben, kann an einem Mangel an geeigneten Simulatoren liegen. So handelte es sich bei den in der Vergangenheit in Studien untersuchten Simulatoren meist um einfache selbst gebaute Simulatoren, wie z.B. aus Schaumstoff gebaute Blöcke mit simplen geometrischen Formen (23-25). Diese haben den Vorteil, dass sie meist mit geringen Kosten hergestellt werden können. Sie bilden jedoch die Anatomie nicht nach und bieten daher eine wenig realistische Simulationsumgebung. 3D-Druck-Verfahren bieten vielversprechendes Potential zur Herstellung von realistischen Interventionsphantomen auf Grundlage von Bildgebung von Patienten. Viele dieser Verfahren sind jedoch aufwändig, kostenintensiv oder würden sich aufgrund der Materialzusammensetzung nicht für repetitive Punktionen eignen. Deshalb wird in dieser Arbeit eine papierbasierte 3D-Druckmethode entwickelt und untersucht, die die Herstellung von realistischen Interventionsphantomen ermöglicht.

Die Fragestellungen dieser Arbeit waren folglich:

- 1) Kann Tintenstrahldruck mit strahlenschwächenden Tinten auf Papier genutzt werden, um CT-Phantome zu entwickeln, die die Anatomie und Strahlenschwächung von Patienten realistisch nachbilden?
- 2) Wie entwickelt sich die Lerndynamik bei Medizinstudierenden in einem Simulationstraining von CT-gestützten PRTs an realistischen Phantomen und welche Empfehlungen lassen sich hieraus für die optimale Gestaltung des Trainings ableiten?
- 3) Ist es möglich, eine PRT allein anhand von CT-Scout-Aufnahmen zu planen und durchzuführen und lässt sich dadurch Strahlung einsparen?

2. Material und Methodik

2.1 Entwicklung von CT-Phantomen

Die Idee der ersten Studie war, ein einfaches, kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von CT-Phantomen zu entwickeln, die im Maßstab und in der Strahlenschwächung spezifische Patientenanatomien authentisch abbilden können. CT-Bilder enthalten graustufenkodierte Informationen zur Strahlenschwächung und Anatomie von Patienten. Kaliumiodid ist das in der CT meist verwendete Kontrastmittel, es ist gut verfügbar und bietet hohe Strahlenabsorption in der CT. Darauf aufbauend wurde ein neues 3D-Druckverfahren entwickelt, bei dem CT-Bilder mit Tintenstrahldruckern und jodhaltigen Tinten auf Papier gedruckt wurden. Anschließend wurden die bedruckten Papiere gestapelt und in der CT untersucht. Der Druck erfolgte mit einem Standard-Tintenstrahldrucker (Hewlett Packard Deskjet 6940), dessen schwarze Tintenpatrone mit einer Kaliumiodidlösung (600 mg/ml) befüllt wurde. Als Druckvorlage wurden CT-Bilder des Abdomens eines Patienten verwendet. Es wurden CT-Aufnahmen eines ein Zentimeter dicken Stapels der so bedruckten Blätter durchgeführt, die wiederum einem Zentimeter des Patientenscans entsprachen. Im nächsten Schritt wurden Rechtecke verschiedener Graustufen ausgedruckt und aufeinandergestapelt. Es wurden CT-Aufnahmen dieser geometrischen Phantome angefertigt und die CT-Zahlen der einzelnen Rechtecke ausgemessen. Aus dem Zusammenhang von Graustufe und gemessenen CT-Zahlen wurde im letzten Schritt eine Ausgleichskurve bestimmt. Darauf aufbauend wurde eine Prozedur zur Graustufenkorrektur der Druckvorlagen entwickelt, um ein Phantom mit realistischer Anatomie und realistischen CT-Zahlen herzustellen (26).

In einer weiteren Studie von Jahnke et al. von 2018 wurde das eben geschilderte Prinzip modifiziert, um Phantome für CT-gestützte Interventionen zu entwickeln. Hierzu wurden die mit Kaliumiodidlösung bedruckten Papierbögen im Wechsel mit 1 mm dickem Polyethylenschaum gestapelt, auf die Körpermaße des Patienten zugeschnitten und zusammengeklebt. Auf diese Weise konnte ein Interventionsphantom hergestellt werden, das wiederholte Punktionen ermöglicht und zugleich die Patientenanatomie realistisch abbildet. Durch die andere Materialzusammensetzung waren die absoluten CT-Zahlen im Phantom deutlich niedriger als die im CT des Patienten. Das Fenster kann während der CT-gestützten Punktionen jedoch so gewählt werden, dass der Bildeindruck dem des Patienten-CTs im herkömmlichen Fenster entspricht. Somit ist dieser Aspekt für die Anwendung innerhalb der Simulation unerheblich, solange die Bilder in der entsprechenden Fensterung angezeigt werden (27).

2.2 PRT-Simulationstraining

In unserer zweiten Studie wurde eines der entwickelten Interventionsphantome in ein realistisches Simulationstraining eingebunden und dieses wurde evaluiert. Siebzehn Medizinstudierende nahmen an der Studie teil und erhielten vor Beginn des Trainings eine theoretische Einführung in die CT-gesteuerte PRT zusammen mit einer Präsentation zur Erläuterung des Simulationsverfahrens. Das Training bestand aus drei Sitzungen. Die zweite Sitzung erfolgte eine Woche und die dritte mindestens vier Wochen nach der ersten Sitzung. In jeder Trainingseinheit führten die Teilnehmer eine CT-gesteuerte PRT je Nervenwurzel L2 bis L4 beider Seiten in Freihandtechnik durch, somit insgesamt sechs Eingriffe je Trainingssitzung. Das Abdomen-Interventionsphantom wurde in Bauchlage auf dem Tisch eines Canon Aquilion One CT-Systems (Canon Medical Systems, Otawara, Japan) platziert, durch Teile einer lebensgroßen Schaufensterpuppe ergänzt und mit sterilen Tüchern abgedeckt. Es wurde eine Spiral-CT-Aufnahme erstellt, die dann von den Teilnehmern zur Planung des Nadelzugangs an der CT-Konsole verwendet wurde. Die Teilnehmer simulierten die Lokalanästhesie. Sie positionierten die 21G-Chiba-Nadel (Länge 10 cm) an der Zielnervenwurzel. Zur Simulation der Applikation von Lokalanästhetika und Therapeutika wurden luftgefüllte Spritzen verwendet. Die Teilnehmer wurden instruiert, sterile Bedingungen einzuhalten und den CT-Raum für die Bildaufnahmen zu verlassen, um Strahlenexposition zu vermeiden. Es wurden folgende Parameter aufgezeichnet: Die benötigte Interventionsdauer, die Anzahl der Bilder und die

erreichte Anzahl an Checklistenpunkten. Die Checkliste hatte maximal sechs zu erreichende Punkte und es wurde jeweils ein Punkt vergeben für die korrekte und eigenständige Durchführung der Planung des Zugangs an der CT-Konsole, der Markierung des Nadelzugangs am Phantom, der Lokalanästhesie, der Nadelpositionierung, der Verabreichung des Therapeutikums und für die Einhaltung steriler Bedingungen. Zudem waren vor dem Training und nach jeder Trainingseinheit Fragebögen auszufüllen.

Die Parameter Interventionsdauer, Anzahl der Bildaufnahmen und Checklisten-Score wurden mittels Varianzanalyse für wiederholte Messungen verglichen und die p-Werte für multiple Vergleiche wurden mit der Tukey-Methode korrigiert. Um zu analysieren, ob Unterschiede in der ersten Trainingseinheit zwischen den Teilnehmenden den Trainingserfolg im Weiteren beeinflussten, wurden die Teilnehmenden entsprechend ihrer anfänglichen Interventionsdauer in der ersten Trainingssitzung in eine Gruppe derer, die in der ersten Einheit schneller waren ($n = 8$) und eine andere Gruppe derer, die langsamer waren ($n = 9$), eingeteilt. Mann-Whitney-U-Tests wurden verwendet, um die Ergebnisse zwischen diesen Gruppen innerhalb jeder Trainingssitzung zu vergleichen.

2.3 Interventionstechnik

In unserer dritten Studie wurde eine neue Vorgehensweise bei periradikulären Therapien entwickelt, die darauf beruht, dass statt eines Planungs-CTs nur der Planungs-Scout gefahren wird und dann anhand geometrischer Messungen die optimale Nadelposition und der nötige Vorschubwinkel und die Vorschubtiefe berechnet werden („Scout-gestützte Technik“). Dem Vorgehen liegt die Hypothese zugrunde, dass in einem anteroposterioren und lateralen Scout bereits genügend Informationen vorhanden sein sollten, um die Punktionsnadel im Rahmen einer PRT an der Nervenwurzel zu positionieren. Um dies zu prüfen, wurde die Leistung zweier Gruppen verglichen: Die erste führte die Scout-gestützte Technik durch, die zweite führte das klassische Vorgehen durch, das unter 1.2 geschildert wurde („Freihandtechnik“).

Das Vorgehen wird in den Abbildungen 1-3 in (28) visualisiert. Der vertikale Abstand b von der Haut zur Wirbelkörperhinterkante wurde auf dem lateralen Scoutbild gemessen. Der horizontale Abstand y von der Mittellinie zum lateralen Rand des Wirbelkörpers wurde auf dem anteroposterioren Scoutbild gemessen. Der horizontale Abstand a von

der Seitenkante des Wirbelkörpers bis zum Nadeleinstichpunkt kann innerhalb eines begrenzten Bereichs frei gewählt werden. Er wurde als Mittelwert von 200 Messungen aus unserer klinischen Datenbank festgelegt, um für die meisten Patienten einen möglichst sinnvollen Abstand zu erhalten. Die Summe der Abstände y und a ergibt die Distanz d der Mittellinie zum Nadeleinstichpunkt. Mithilfe des Satzes des Pythagoras und der Winkelfunktionen wurden die Einstichtiefe c und der Einstichwinkel α berechnet. Ein Geometrie-Dreieck wurde zur Messung von Längen und Winkeln unter einer durchsichtigen sterilen Abdeckung auf dem Instrumententisch platziert. Mit dessen Hilfe wurde die Winkelführung vorbereitet, indem eine Anästhesienadel in die Schutzkappe einer Chiba-Nadel mit dem berechneten Abstand d vom Rand und dem berechneten Winkel α eingeführt wurde. Der Kanülenreiter an der 20G Chiba-Therapienadel wurde auf die berechnete Punktionstiefe c eingestellt. Um die Nadel zu platzieren, wurde die so präparierte Schutzkappe entlang der Gantry-x-Achse auf die Haut des Phantoms gelegt und die Therapienadel wurde parallel zur Winkelführung vorgeschoben, bis der Kanülenreiter das Hautniveau erreichte.

Die Gruppe, die die Scout-gestützte Technik anwandte, bestand aus zwei Radiologen und führte fünfzig CT-geführte Nadelplatzierungen, jeweils zehn an fünf verschiedenen Phantomen, in den Segmenten L1 bis L4 durch. Die endgültige Nadelposition wurde mit einem Single-Shot-Bild bestätigt. Die teilnehmenden Radiologen waren angewiesen, die Sicherheit des Patienten in den Vordergrund zu stellen und konnten dazu auch zusätzliche Single-Shot-Kontrollbilder anfertigen. In der Kontrollgruppe, die aus zehn Radiologen bestand, wurden zehn CT-geführte Nadelplatzierungen in Freihandtechnik durchgeführt. Zuvor wurde für die Planung ein 10-cm-Spiral-CT angefertigt, die das Zielsegment der Lendenwirbelsäule abdeckte.

Die Verfahren wurden als sicher und erfolgreich eingestuft, wenn die Nadelspitze auf dem letzten Kontrollbild in einer adäquaten Position für die PRT lag und während der Platzierung keine kritische Struktur versehentlich penetriert wurde. Gemessen wurden jeweils die Parameter ‚Anzahl der Fluoroskopie-Bilder‘ und ‚Dosis-Längen-Produkt (DLP)‘. Der Mann-Whitney-U-Test wurde zum Vergleich dieser Parameter zwischen der Scout-gestützten und der Freihand-Technik verwendet.

3. Ergebnisse

3.1 Entwicklung von CT-Phantomen

Das erste Abdomen-Phantom konnte bereits die Form und Anatomie des Patienten-CTs realistisch wiedergeben. Die CT-Zahlen des Phantoms wichen jedoch noch deutlich von denen des Patienten ab. Die Analyse der geometrischen Phantome, die auf Grundlage von Rechtecken verschiedener Graustufen gedruckt worden waren, zeigte eine exponentielle Korrelation zwischen den Graustufen des Druckmusters und den resultierenden Schwächungswerten, die wir mit folgender Formel abbildeten:

$$D(x) = a \cdot (e^{b \cdot x} - 1) + c$$

Hierbei entspricht $D(x)$ der CT-Zahl in Hounsfield-Einheiten, e ist die Eulersche Zahl, x ist die Graustufe in % und a , b und c sind Fit-Parameter, wobei $c = D(0)$ der Strahlenschwächung in HU des unbedruckten Papiers entspricht. Wir bestimmten a zu 71,25 HU, b zu 0,03041 und c zu -189,25 HU.

Über die Umkehrfunktion $D^{-1}(x) = \frac{\ln\left(\frac{x+a-c}{a}\right)}{b}$, wobei x hier der in den Bilddaten vorgegebenen CT-Zahl und $D^{-1}(x)$ der zuzuordnenden Graustufe entspricht, konnte so eine Grauskalenkorrektur durchgeführt werden. Nach Anwendung des Korrekturverfahrens auf das Abdomen-Phantom konnte eine lineare Korrelation zwischen den CT-Zahlen von Phantom und Patient bestätigt werden, sodass sowohl Anatomie als auch Schwächungseigenschaften realistisch nachgebildet wurden.

3.2 PRT-Simulationstraining

In der Studie, die das PRT-Simulationstraining untersuchte, zeigte sich ein deutlicher Trainingseffekt zwischen der ersten und der zweiten Sitzung mit einer Verbesserung aller gemessenen Parameter (siehe Tabelle 1): eine verringerte Interventionsdauer, eine verringerte Zahl benötigter Bilder und eine deutlich verbesserte Checklisten-Punktzahl. Während die Interventionsdauer und die Anzahl an Kontrollbildern in der dritten Sitzung konstant blieben, fiel die Checklisten-Punktzahl wieder leicht, was darauf hindeutet, dass die Fertigkeiten zur Nadelplatzierung erhalten blieben, das genaue Wissen über Ablauf und Durchführung jedoch zum Teil verloren ging.

Tabelle 1: Leistungsmetriken aller Teilnehmenden in den drei Trainingssitzungen

	Sitzung 1	p-Werte	Sitzung 2	p-Werte	Sitzung 3
Interventionsdauer (s)	324,9 (277,8 – 371,9)	< 0,001	222,3 (192,9 – 251,7)	0,843	212,7 (189,5 – 235,8)
Anzahl Bildaufnahmen	8,2 (7,4 – 9,1)	< 0,001	6,7 (6,1 – 7,4)	0,691	6,5 (6,0 – 6,9)
Checklisten-Punktzahl	3,2 (2,8 – 3,6)	< 0,001	5,7 (5,5 – 5,9)	0,008	4,9 (4,6 – 5,3)

Die Werte sind als Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervall in Klammern angegeben. Die p-Werte ergeben sich jeweils aus dem Vergleich der Parameter in den angrenzenden Spalten. Adaptiert nach (29).

In der ersten Trainingssitzung langsamere Teilnehmende wurden in der zweiten Sitzung signifikant schneller und benötigten weniger Bildaufnahmen ($p < 0,001$). Im Gegensatz dazu verbesserten sich die Teilnehmenden, die in der ersten Sitzung schneller waren, in den folgenden Sitzungen nicht weiter signifikant. Wie Tabelle 2 zu entnehmen, waren die Unterschiede in der Interventionsdauer und der Anzahl an Bildaufnahmen zwischen der langsameren und der schnelleren Gruppe in der ersten und zweiten Trainingssitzung signifikant, aber nicht in der dritten Trainingssitzung. Die Ergebnisse der Checkliste unterschieden sich in keiner der Trainingseinheiten signifikant zwischen den Gruppen.

Tabelle 2: Statistischer Vergleich der Gruppen der in Sitzung 1 schnelleren und langsameren Teilnehmenden

	Sitzung 1 Gruppe 1	Sitzung 1 Gruppe 2	p-Werte	Sitzung 2 Gruppe 1	Sitzung 2 Gruppe 2	p-Werte	Sitzung 3 Gruppe 1	Sitzung 3 Gruppe 2	p-Werte
Interventionsdauer (s)	224,3 (179,7 – 268,8)	414,3 (341,4 – 487,1)	< 0,001	190,3 (151,2 – 229,4)	250,8 (207,8 – 293,9)	0,014	199,6 (168,5 – 230,7)	224,3 (189,9 – 258,7)	0,287
Anzahl Bildaufnahmen	6,5 (5,7 – 7,4)	9,8 (8,5 – 11,0)	< 0,001	6,1 (5,2 – 7,0)	7,3 (6,5 – 8,2)	0,009	6,1 (5,5 – 6,7)	6,8 (6,1 – 7,5)	0,217
Checklisten-Punktzahl	2,9 (2,2 – 3,6)	3,4 (2,9 – 4,0)	0,221	5,6 (5,2 – 6,1)	5,8 (5,4 – 6,1)	0,620	4,8 (4,2 – 5,3)	5,1 (4,5 – 5,7)	0,412

Gruppe 1 (n = 8): Gruppe der in Sitzung 1 schnelleren Teilnehmenden. Gruppe 2 (n = 9): Gruppe der in Sitzung 1 langsameren Teilnehmenden. Die Werte sind als Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervall in Klammern angegeben. Die p-Werte ergeben sich jeweils aus dem Vergleich zwischen den beiden Gruppen. Adaptiert nach (29).

Die in Abbildung 4 in (29) veranschaulichte Aufschlüsselung der einzelnen Interventionen zeigte, dass eine Steigerung der Leistung auch innerhalb der einzelnen Sitzungen stattfand mit jeweils niedrigerer Interventionsdauer sowie Anzahl an Kontrollbildern in den letzten drei im Vergleich zu den ersten drei Durchführungen. Außerdem wurde die beste Leistung jeweils in der fünften Intervention erreicht. Die in Abbildung 6 in (29) gezeigten Fragebögenenergebnisse offenbarten, dass die Selbsteinschätzung nach der ersten

Trainingseinheit sehr gut war und dann über die nächsten Sitzungen hinweg relativ konstant blieb. Vierzehn der siebzehn Teilnehmenden fühlten sich nach dem Training in der Lage, den Eingriff unter Anleitung eines erfahrenen Radiologen eigenständig durchzuführen. Diese Einschätzung entsprach dem Lernziel des Trainings. Fünf Teilnehmende trauten sich sogar zu, den Eingriff ganz ohne Supervision durchzuführen und sechs weitere widersprachen dem zumindest nicht.

3.3 Interventionstechnik

Die retrospektive Analyse der PRTs ergab einen horizontalen Abstand von der Seitenkante des Wirbelkörpers bis zum Nadeleinstichpunkt, a , von 44 ± 19 mm (Mittelwert \pm SD). Der Abstand a wurde daher für alle Scout-gestützten Verfahren auf 44 mm festgelegt. Ebenso wie in der Kontrollgruppe konnten in der Gruppe, die das Scout-gestützte Vorgehen anwandte, alle Interventionen erfolgreich durchgeführt werden. Für die Scout-gestützte Technik wurden signifikant weniger Bildaufnahmen ($3,5 \pm 2,3$ vs. $10,8 \pm 5,3$ [Mittelwert \pm SD], $p < 0,0001$) und signifikant weniger Dosis benötigt ($3,5 \pm 2,5$ vs. $11,9 \pm 5,8$ mGy cm [Mittelwert \pm SD], $p < 0,0001$) als in der Vergleichsgruppe mit der Freihandtechnik.

4. Diskussion

4.1 Zusammenfassende Darstellung

Die PRT ist eine etablierte Therapieform des Nervenwurzelreizsyndroms. Simulationen werden in anderen Bereichen der Medizin erfolgreich angewandt, weshalb sie auch zum Erlernen und zur Entwicklung von PRT-Techniken vielversprechend eingesetzt werden können. Anatomisch realistische Interventionsphantome unterstützen dabei die Übertragbarkeit von Simulationsergebnissen in die klinische Anwendung. Daher wurde in dieser Arbeit ein neues, papierbasiertes 3D-Druckverfahren entwickelt, das auch die Herstellung von Interventionsphantomen ermöglichte. Es gibt unterschiedliche Ansätze der Durchführung einer CT-gestützten PRT, die teilweise mit einer deutlichen Dosisbelastung einhergehen. Wir entwickelten an den Interventionsphantomen ein innovatives Vorgehen, das die Dosis gegenüber dem Standardverfahren unserer Klinik reduzieren kann. Wie jede Fertigkeit muss auch die Technik der PRT erlernt und geübt werden, bevor eine sichere Durchführung garantiert werden kann. Wir entwickelten daher ein Simulationstraining für CT-gestützte PRTs und evaluierten dieses.

4.2 Diskussion und Schlussfolgerungen im Literaturkontext

Das von uns entwickelte Verfahren zur papierbasierten Phantomherstellung ergänzt bereits bestehende Methoden der Herstellung von Phantomen auf Grundlage von Bildgebung. Bestehende Verfahren nutzen zur Imitation verschiedener Gewebe Materialien unterschiedlicher Strahlenschwächungen, was die Verfahren häufig komplex macht. So wird beispielsweise in einer Studie von Hazelaar et al. von 2018 eine Methode vorgestellt, bei der Knochen durch Gips, Lungenstrukturen durch Nylon und Weichgewebe durch Silikon nachgebildet wurden. Hierbei wurden Gips und Nylon direkt 3D-gedruckt und Silikon in eine 3D-gedruckte Form gegossen. Die Einzelteile wurden dann zu einem Phantom zusammengesetzt (30). Unser Verfahren hat gegenüber dieser und ähnlichen Methoden den Vorteil, dass es weniger Arbeitsschritte der Herstellung benötigt und kostengünstig ist. Jedoch können CT-Zahlen unterhalb der Strahlenschwächung von gestapeltem Papier (ca. -196 HU) nicht ohne Perforation des Papiers wiedergegeben werden.

Die grundsätzliche Anwendbarkeit der von uns entwickelten Phantome erstreckt sich über weite Felder wie z. B. Personaltraining zum Erlernen des Anfertigen von CT-Bildern, Demonstration des Einflusses verschiedener CT-Parameter auf die Bildgebung, Geräteprüfung und -kalibrierung, Qualitätssicherung, dosimetrische Untersuchungen, Untersuchungen zur diagnostischen Leistung und Bildqualität von CT-Bildern (31, 32) etc. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Anwendung für die Simulation von Interventionen. Die Interventionsphantome eignen sich unter anderem für das Training von Anfängern zur Erarbeitung von Grundfertigkeiten vor dem Patientenkontakt und für die Entwicklung neuer Techniken der Durchführung wie in dieser Arbeit anhand der PRT demonstriert.

Durch eine realistische Simulationsumgebung und ein anatomisch getreues Phantom ergänzt unsere Studie zum Simulationstraining der CT-gestützten PRT frühere Studien, die das Training der Nadelplatzierung in Phantomen ohne Ähnlichkeit zum menschlichen Körper untersuchten (23-25). Die Teilnehmenden legten Wert auf die Realitätsnähe der Simulation, ebenso wie erfahrene Radiologen in einer vorhergehenden Evaluation der Simulationsumgebung (27). Diese Realitätsnähe ermöglichte erstens, die Schritte der PRT in ähnlicher Weise wie am Patienten durchzuführen. Dieses ist besonders wichtig,

da der Zweck des in dieser Arbeit entwickelten Simulationstrainings war, medizinisch vorgebildete Anfänger durch Vermittlung der Abläufe und grundlegenden Fertigkeiten der CT-gestützten PRT optimal auf den Eingriff an Patienten vorzubereiten. Zweitens ermöglichte sie es, einzelne Fertigkeiten detaillierter zu untersuchen, beispielsweise das Orientierungsvermögen in der Patientenanatomie, worin die Teilnehmenden eine Verbesserung durch das Training angaben.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die wesentliche Steigerung der Fertigkeiten in der ersten Trainingseinheit erreicht wird. Die Fertigkeiten werden innerhalb einer Woche beibehalten, während ein Teil des Wissens nach vier Wochen wieder verloren geht. Eine Leistungssteigerung tritt auch innerhalb einzelner Trainingssitzungen auf, wie in ähnlicher Weise bereits in einer früheren Arbeit zur fluoroskopischen Facettengelenkinjektion berichtet wurde (33). Basierend auf diesen Beobachtungen kommen wir zu dem Schluss, dass eine Trainingseinheit mit fünf Pktionen, die zeitnah vor der Durchführung am Patienten stattfindet, den besten Nutzen der Simulation in Bezug auf die Vorbereitung auf PRTs darstellt.

Ein derartiges Simulationstraining ließe sich sinnvoll in interventionell-radiologische Ausbildungscurricula eingliedern. Sowohl von der europäischen Fachgesellschaft "Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe" (CIRSE) (34) als auch von der Deutschen Gesellschaft für Interventionelle Radiologie und minimalinvasive Therapie (DeGIR) (35) sind Curricula für die interventionelle Radiologie entwickelt worden. In der Zukunft könnte Simulation zunehmend in solche Curricula integriert werden. Die PRT umfasst die wesentlichen Schritte und Aspekte, die jede CT-gestützte Intervention beinhaltet, z.B. die Planung des Eingriffs an der Konsole, die Nadelplatzierung unter CT-fluoroskopischer Kontrolle und steriles Arbeiten. Zugleich gehört sie zu den weniger komplexen CT-Interventionen. Beispielsweise ist nur selten durch komplizierte anatomische Verhältnisse eine doppelte Anwinkelung in axialer Ebene und in z-Achse nötig. Somit stellt die PRT eine ideale Einstiegstechnik für Anfänger in der interventionellen Radiologie dar. Wenn die PRT einen der ersten Eingriffe darstellt, die von Anfängern in der Radiologie an Patienten durchgeführt werden, dann ist es besonders sinnvoll, ein Simulationstraining wie das von uns entwickelte als Vorbereitung anzubieten. Dennoch eignen sich die dargestellten Phantome neben der hier behandelten PRT noch für eine Reihe weiterer möglicher Interventionen, die in Zukunft

noch weiter ausgearbeitet werden können. Beispielsweise könnten Pathologien integriert werden, sodass Tumorbiopsien geübt werden könnten.

Unsere Technik der Phantomherstellung eignet sich auch zur Simulation verschiedener Patientenanatomien, was genutzt werden könnte, um das Simulationstraining noch zu erweitern. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde in unserer Studie, die das Simulationstraining untersuchte, an einem einzigen Phantom gearbeitet. In der Studie, die die Scout-gestützte Technik untersuchte, wurden hingegen fünf verschiedene Phantome eingesetzt und es ließen sich mit unserem Verfahren eine Vielzahl an Patientenanatomien nachbilden, auch solche mit fortgeschrittenen degenerativen Veränderungen oder von adipösen Patienten, was die Schwierigkeit der Durchführung erhöht. Mehr Variabilität in den Phantomanatomien könnte den Lerneffekt potentiell erhöhen und ein Lehrcurriculum könnte auch stufenweise aufgebaut werden, sodass beispielsweise auf eine Trainingseinheit an einem Phantom mit geringer Schwierigkeitsstufe noch eine weitere mit höherer Schwierigkeitsstufe folgen könnte, bevor der Teilnehmer die Intervention an Patienten durchführt.

Bei der Einführung eines Simulationstrainings in die klinische Ausbildung spielen im Sinne einer Kosten-Nutzen-Abwägung die durch Simulationstrainings verursachten Kosten eine wichtige Rolle. Sie lassen sich drei Kategorien zuordnen:

1. Materialkosten für Verbrauchsmaterialien wie Punktionsnadeln oder sterile Tücher. In unserer Simulation konnten diese Kosten beispielsweise durch die mehrfache Verwendung der gleichen Nadel reduziert werden, wodurch die Realitätstreue der Simulation nur unwesentlich verringert wird.
2. Kosten für die Phantomherstellung: Je höher die Originaltreue, desto höher sind normalerweise die Kosten zur Herstellung eines Phantoms (36). Unsere Methode bietet durch die vergleichsweise einfache Fertigung ein relativ kostengünstiges, aber dennoch anatomisch getreues Phantom.
3. Zeitaufwand des die Simulation betreuenden Personals: In einer Studie von Cook et al. wurde dieser Faktor als wesentlichstes Hindernis für die Einführung von Simulationstrainings betrachtet (37). Das von uns empfohlene Simulationstraining hat mit nur fünf Wiederholungen in einer Sitzung jedoch einen relativ geringen Zeitaufwand. Sollte bei gewissen Teilnehmenden weiterer Trainingsbedarf bestehen, könnten diese das Simulationstraining auch eigenständig weiterführen. Außerdem kann die Zeit

eingespart werden, die sonst bei der Einarbeitung des Assistenzarztes am Patienten an Mehraufwand gegeben wäre.

Während in der bisherigen Diskussion der Fokus auf dem Nutzen von Simulationstraining für Assistenzärzte lag, ergeben sich interessante Einsatzmöglichkeiten auch für Medizinstudierende. Diese wurden in unsere Simulationsstudie eingeschlossen, da so eine ausreichend große Gruppe medizinisch vorgebildeter, aber in der interventionellen Radiologie nicht vorerfahrener Teilnehmer, die in etwa Anfängern in der Radiologie vergleichbar sind, gewonnen werden konnte. Jedoch stellen Medizinstudierende an sich auch eine interessante Zielgruppe für Simulationstraining in der Radiologie dar. Aufgrund ihrer zunehmenden Bedeutung wurde mehrfach gefordert, die interventionelle Radiologie mehr in das Curriculum des Medizinstudiums aufzunehmen (38-40). Wie für andere medizinische Fachgebiete bereits gezeigt wurde, lässt sich mit Simulation effektiv Interesse bei Medizinstudierenden für eine medizinische Disziplin wecken bzw. verstärken (41, 42). Die guten Zufriedenheitswerte in unserer Studie weisen darauf hin, dass das PRT-Simulationstraining dafür geeignet sein könnte. Anders als bei radiologischen Assistenzärzten, bei denen das systematische Erlernen der Techniken zum Einsatz am Patienten im Vordergrund steht, wäre das Ziel bei den Medizinstudierenden, sie an das Fach heranzuführen und ihnen die Möglichkeit zu geben, ihr Talent für die interventionelle Radiologie zu entdecken.

In Studien, die Lernerfolg bzw. Lerndynamiken untersuchen, spielt die Auswahl der gemessenen Parameter eine wichtige Rolle, da es leicht zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse kommen kann, wenn die Parameter nicht die verschiedenen Dimensionen der Fertigkeiten widerspiegeln. In anderen Studien zum phantombasierten Training CT-gestützter Interventionen wurden verschiedene Parameter als Leistungsmetriken angewandt: die Anzahl der erforderlichen Nachjustierungen der Nadel, um die endgültige Nadelposition zu erreichen (23, 43), Checklisten, die wichtige Schritte der Interventionen abbilden (23, 24), Anzahl der Bildaufnahmen (23, 25), Dosis (23), Interventionsdauer (23, 44). In unserer Studie nutzten wir Metriken mit Bezug auf den klinischen Arbeitsablauf (Interventionsdauer) und den Einsatz von Strahlung (Anzahl der Bildaufnahmen). In der Gruppe der Teilnehmenden, die in der ersten Sitzung bereits sehr schnell waren, konnte keine Verbesserung dieser Metriken festgestellt werden. Eine mögliche Interpretation ist, dass diese Trainierenden zwar schnell, aber auch weniger vorsichtig in einer

Simulationsumgebung sind. Mangelnde Vorsicht zu Beginn des Trainings kann dann mit Geschicklichkeit verwechselt werden. Der tatsächliche Zugewinn der Teilnehmenden an Geschicklichkeit durch das Training könnte dann nicht dargestellt werden, sodass diese Metriken für sich allein betrachtet irreführend wären. Wir empfehlen daher die Verwendung zusätzlicher Leistungsmetriken, die die Präzision und Qualität der Durchführung abbilden, wie z. B. die Erhebung einer Checklisten-Punktzahl, die in unseren Experimenten zeigte, dass alle Teilnehmenden von dem Training profitierten.

Auch evaluierten wir in unserer Studie die Selbsteinschätzung und Zufriedenheit der Teilnehmenden. Es konnte in der Literatur gezeigt werden, dass Selbsteinschätzung, insbesondere bei Anfängern, nicht mit Leistung korreliert und Zufriedenheit nicht als Marker für den Lerneffekt gelten kann (45-47). Selbsteinschätzung und Zufriedenheit dürfen daher nicht als Leistungsmetriken missinterpretiert werden. Dennoch haben sie ihre Berechtigung: Die Zufriedenheit kann als Marker für die potentielle Motivation gelten, mit der Teilnehmende ein Training zu Ende führen, und die Selbsteinschätzung kann eine Selbstüberschätzung anzeigen. Nach dem Training fühlte sich eine signifikante Anzahl der Teilnehmenden imstande, Eingriffe an Patienten ohne die Aufsicht eines erfahrenen Radiologen durchzuführen. Dies deutet auf eine Überschätzung ihrer Fähigkeiten hin, über die schon früher nach Simulationstrainings berichtet wurde und die potenziell Patienten schaden kann (43, 48-50). Ein umfangreiches Simulationstraining kann dazu führen, dass sich die Teilnehmenden an die Simulation gewöhnen, anstatt sich besser auf die Durchführung am Patienten vorzubereiten. Wir schlagen daher vor, dass zusätzliches Simulationstraining angeboten werden kann. Es sollten jedoch, wie schon von Rall et al. gefordert, die Limitationen der Simulation und die daraus abzuleitende Notwendigkeit für weiteres supervidiertes Training an Patienten den Auszubildenden klar kommuniziert werden (51).

In unserer dritten Studie entwickelten wir einen Ansatz zur rein Scout-gestützten Nadelplatzierung zur PRT der Lendenwirbelsäule unter Nutzung der Standardausrüstung mit dem Ziel der Dosisreduktion. Wir konnten zeigen, dass die Scout-gestützte Technik in der Simulation zu einer Reduktion der Anzahl an Kontrollbildern um 68% und der Dosisbelastung um 84% im Vergleich zu einer konventionellen Freihandtechnik führte. Assistenzsysteme wie Laser-gestützte Systeme (9, 10), elektromagnetisches Tracking (11, 12), robotergestützte Systeme (52, 53) oder auch Smartphone-basierte augmented-

reality-Techniken (54) haben in Studien gezeigt, dass sie die Genauigkeit der Nadelplatzierung verbessern. Sie haben das Potential, die Fluoroskopiezeit auch für komplexere Interventionen zu verringern, weisen aber allesamt den Nachteil auf, dass sie zur Eingriffsplanung initiale Spiral-CT-Aufnahmen erfordern, welche mit einer relevanten Dosisbelastung einhergehen. Im Gegensatz dazu reduziert der in unserer Studie entwickelte Ansatz für die PRT die Durchführungszeit, ohne dass eine initiale CT-Aufnahme oder teures zusätzliches Equipment benötigt wird.

In der Theorie kann ein einzelnes Kontrollbild zur endgültigen Bestätigung der adäquaten Nadellage ausreichen. Die Radiologen, die diese Technik in unserer Studie anwendeten, empfanden jedoch zusätzliche Bildaufnahmen während der Nadelplatzierung als hilfreich, um die korrekte Ausrichtung der Nadel zu bestätigen und damit die Patientensicherheit zu gewährleisten. Dies kann allerdings auch der Neuheit des Vorgehens geschuldet sein. Bei der Anwendung der Scout-gestützten Technik an Patienten sind zusätzliche Kontrollbilder daher ebenfalls zunächst angeraten.

4.3 Limitationen

Gewisse Einschränkungen der Studien sind zu diskutieren. Trotz fortschrittlicher Technologien unterscheiden sich Simulationen immer von der Realität. Die entwickelten und eingesetzten Interventionsphantome bildeten beispielsweise keine Atembewegungen nach und ermöglichten keine Kommunikation mit einem schmerzgeplagten Patienten. Zudem ist die Haptik der Knochen nicht berücksichtigt und auch die Haptik des Muskelgewebes des Phantoms entsprach nicht exakt der menschlichen Gewebes (27). Einschränkungen wie diese betonen erneut die Notwendigkeit weiteren Übens unter Anleitung, das durch Simulation nicht ersetzt werden kann. Aufgrund der Studiendesigns konnte unsere Trainingsstudie noch nicht zeigen, dass das Training die Intervention am Patienten verbessert, und unsere Interventionsstudie konnte noch nicht beweisen, dass das Scout-gestützte Verfahren an Patienten ebenso erfolgreich angewendet werden kann wie in der Simulation. Dies zu zeigen kann Inhalt künftiger Studien sein, in denen dann auch patientenbezogene Parameter wie Zufriedenheit mit dem Eingriff, Schmerzlinderung, Nebenwirkungen etc. einbezogen werden können.

4.4 Zusammenfassende Schlussfolgerung

Die Arbeit zeigt die erfolgreiche Herstellung anatomisch detailgetreuer CT-Phantome und veranschaulicht zwei der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten: Einerseits die Anwendung zum Erlernen einer Punktionsfertigkeit, andererseits die Anwendung zur Entwicklung eines neuen Verfahrens für eine Intervention. Das Simulationstraining der CT-gesteuerten PRT in einer realistischen Trainingsumgebung ermöglicht es, schnell grundlegende Fertigkeiten in einer geschützten Umgebung zu erwerben, bevor das weitere Lernen am Patienten stattfindet. Die Probanden sind mit ihren Fortschritten zufrieden und fühlen sich gut vorbereitet, um mit der Anwendung der erworbenen Fertigkeiten im klinischen Kontext fortzufahren. Die Lerndynamik in einer Gruppe von Medizinstudierenden ohne Vorerfahrung lässt darauf schließen, dass eine Trainingseinheit mit fünf Wiederholungen kurz vor der Durchführung an Patienten die meisten Lernenden in die Lage versetzen sollte, zu einem weiteren supervidierten Training am Patienten überzugehen. Die Scout-gestützte PRT der Lendenwirbelsäule konnte unter Nutzung der Standardausrüstung in der Simulation zuverlässig durchgeführt werden und reduzierte die Dosis deutlich. Insgesamt werden die Studien dabei helfen, die Vermittlung und die strahlensparende Durchführung CT-gestützter Interventionen wie der PRT voranzutreiben.

5. Literaturverzeichnis

1. Mack MG, Regier M, Herzog C. Facetteninfiltration und periradikuläre Therapie. *Radiologe*. 2020;60(2):132-7.
2. Meucci RD, Fassa AG, Faria NM. Prevalence of chronic low back pain: systematic review. *Rev Saude Publica*. 2015;49.
3. Stueckle CA, Talarczyk S, Hackert B, Wawro M, Haage P, Weger U. CT-guided Interventional Therapy of Back Pain - Predictors of Success in Treatment. *Rofo*. 2020.
4. Blankenbaker DG, De Smet AA, Stanczak JD, Fine JP. Lumbar radiculopathy: treatment with selective lumbar nerve blocks--comparison of effectiveness of triamcinolone and betamethasone injectable suspensions. *Radiology*. 2005;237(2):738-41.
5. Maurer MH, Schreiter N, de Bucourt M, Grieser C, Renz DM, Hartwig T, Hamm B, Streitparth F. Cost comparison of nerve root infiltration of the lumbar spine under MRI and CT guidance. *European radiology*. 2013;23(6):1487-94.
6. Deml MC, Buhr M, Wimmer MD, Pflugmacher R, Riedel R, Rommelspacher Y, Kabir K. CT-guided infiltration saves surgical intervention and fastens return to work compared to anatomical landmark-guided infiltration in patients with lumbosciatica. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2015;25 Suppl 1:S177-82.
7. Wieners G. CT-Guided Periradicular Therapy (PRT). In: Mahnken AH, Ricke J, Wilhelm KE, editors. *CT-and MR-guided Interventions in Radiology*. 2 ed: Springer; 2013. p. 399-403.
8. Begemann PG. CT-Guided Interventions: Indications, Technique, and Pitfalls. In: Mahnken AH, Ricke J, Wilhelm KE, editors. *CT-and MR-guided Interventions in Radiology*. 2 ed: Springer; 2013. p. 11-24.
9. Moser C, Becker J, Deli M, Busch M, Boehme M, Groenemeyer DH. A novel Laser Navigation System reduces radiation exposure and improves accuracy and workflow of CT-guided spinal interventions: a prospective, randomized, controlled, clinical trial in comparison to conventional freehand puncture. *Eur J Radiol*. 2013;82(4):627-32.
10. Gruber-Rouh T, Lee C, Bolck J, Naguib NN, Schulz B, Eichler K, Aschenbach R, Wichmann JL, Vogl TJ, Zangos S. Intervention Planning Using a Laser Navigation System for CT-Guided Interventions: A Phantom and Patient Study. *Korean J Radiol*. 2015;16(4):729-35.

11. Putzer D, Arco D, Schamberger B, Schanda F, Mahlke J, Widmann G, Schullian P, Jaschke W, Bale R. Comparison of Two Electromagnetic Navigation Systems For CT-Guided Punctures: A Phantom Study. *Rofo*. 2016;188(5):470-8.
12. Appelbaum L, Sosna J, Nissenbaum Y, Benshtein A, Goldberg SN. Electromagnetic navigation system for CT-guided biopsy of small lesions. *AJR American journal of roentgenology*. 2011;196(5):1194-200.
13. Rassie K. The apprenticeship model of clinical medical education: time for structural change. *N Z Med J*. 2017;130(1461):66-72.
14. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Simul Healthc*. 2006;1(4):252-6.
15. Sabir SH, Aran S, Abujdeh H. Simulation-based training in radiology. *Journal of the American College of Radiology*. 2014;11(5):512-7.
16. Chetlen AL, Mendiratta-Lala M, Probyn L, Auffermann WF, DeBenedictis CM, Marko J, Pua BB, Sato TS, Little BP, Dell CM. Conventional medical education and the history of simulation in radiology. *Academic radiology*. 2015;22(10):1252-67.
17. Mirza S, Athreya S. Review of Simulation Training in Interventional Radiology. *Acad Radiol*. 2018;25(4):529-39.
18. Gould D. Using simulation for interventional radiology training. *Br J Radiol*. 2010;83(991):546-53.
19. Konge L, Clementsen PF, Ringsted C, Minddal V, Larsen KR, Annema JT. Simulator training for endobronchial ultrasound: a randomised controlled trial. *Eur Respir J*. 2015;46(4):1140-9.
20. Yunoki K, Sakai T. The role of simulation training in anesthesiology resident education. *J Anesth*. 2018;32(3):425-33.
21. Dawe SR, Pena GN, Windsor JA, Broeders JA, Cregan PC, Hewett PJ, Maddern GJ. Systematic review of skills transfer after surgical simulation-based training. *The British journal of surgery*. 2014;101(9):1063-76.
22. Patel R, Dennick R. Simulation based teaching in interventional radiology training: is it effective? *Clinical radiology*. 2017;72(3):266. e7-. e14.
23. Mendiratta-Lala M, Williams TR, Mendiratta V, Ahmed H, Bonnett JW. Simulation center training as a means to improve resident performance in percutaneous noncontinuous CT-guided fluoroscopic procedures with dose reduction. *AJR American journal of roentgenology*. 2015;204(4):W376-83.

24. Picard M, Nelson R, Roebel J, Collins H, Anderson MB. Use of Low-Fidelity Simulation Laboratory Training for Teaching Radiology Residents CT-Guided Procedures. *Journal of the American College of Radiology : JACR*. 2016;13(11):1363-8.
25. Dimmick S, Jones M, Challen J, Iedema J, Wattuhewa U, Coucher J. CT-guided procedures: evaluation of a phantom system to teach accurate needle placement. *Clin Radiol*. 2007;62(2):166-71.
26. Jahnke P, Limberg FR, Gerbl A, Ardila Pardo GL, Braun VP, Hamm B, Scheel M. Radiopaque Three-dimensional Printing: A Method to Create Realistic CT Phantoms. *Radiology*. 2017;282(2):569-75.
27. Jahnke P, Schwarz FB, Ziegert M, Almasi T, Abdelhadi O, Nunninger M, Hamm B, Scheel M. A radiopaque 3D printed, anthropomorphic phantom for simulation of CT-guided procedures. *European radiology*. 2018;28(11):4818-23.
28. Nunninger M, Braun VPB, Ziegert M, Schwarz FB, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Scout-guided needle placement-a technical approach for dose reduction in CT-guided periradicular infiltration. *Neuroradiology*. 2020;62(3):341-6.
29. Braun VPB, Nunninger M, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Training of CT-guided Periradicular Therapy in a Realistic Simulation Environment - Evaluation and Recommendations for a Training Curriculum. *Acad Radiol*. 2020.
30. Hazelaar C, van Eijnatten M, Dahele M, Wolff J, Forouzanfar T, Slotman B, Verbakel W. Using 3D printing techniques to create an anthropomorphic thorax phantom for medical imaging purposes. *Med Phys*. 2018;45(1):92-100.
31. Ardila Pardo GL, Conzelmann J, Genske U, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. 3D printing of anatomically realistic phantoms with detection tasks to assess the diagnostic performance of CT images. *European radiology*. 2020;30(8):4557-63.
32. Conzelmann J, Schwarz FB, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Development of a method to create uniform phantoms for task-based assessment of CT image quality. *J Appl Clin Med Phys*. 2020;21(9):201-8.
33. Dias TR, Alves Junior JDC, Abdala N. Learning curve of radiology residents during training in fluoroscopy-guided facet joint injections. *Radiol Bras*. 2017;50(3):162-9.
34. Belli AM, Reekers JA, Lee M. The importance of curriculum-based training and assessment in interventional radiology. *Cardiovascular and interventional radiology*. 2014;37(1):8-10.

35. Mahnken AH, Bucker A, Hohl C, Berlis A. White Paper: Curriculum in Interventional Radiology. *Rofo*. 2017;189(4):309-11.
36. Klein KA, Neal CH. Simulation in Radiology Education: Thinking Outside the Phantom. *Acad Radiol*. 2016;23(7):908-10.
37. Cook TS, Hernandez J, Scanlon M, Langlotz C, Li CD. Why Isn't There More High-fidelity Simulation Training in Diagnostic Radiology? Results of a Survey of Academic Radiologists. *Acad Radiol*. 2016;23(7):870-6.
38. Lee AM, Lee MJ. Teaching IR to Medical Students: A Call to Action. *Cardiovascular and interventional radiology*. 2018;41(2):203-5.
39. Alsafi Z, Bhrugubanda V, Ramachandran S, Alsafi A, Hamady M. Is it Time for a Specific Undergraduate Interventional Radiology Curriculum? *Cardiovascular and interventional radiology*. 2017;40(7):1062-9.
40. Ojha U, Mohammed R, Vivekanantham S. Should there be greater exposure to interventional radiology in the undergraduate curriculum? *Adv Med Educ Pract*. 2017;8:791-5.
41. Tesche LJ, Feins RH, Dedmon MM, Newton KN, Egan TM, Haithcock BE, Veeramachaneni NK, Bowdish ME. Simulation experience enhances medical students' interest in cardiothoracic surgery. *Ann Thorac Surg*. 2010;90(6):1967-73; discussion 73-4.
42. Zargaran D, Turki M, Farzaneh B, Subramaniam M, Motahariasl N, Zargaran A. Evaluating the effectiveness of plastic surgery simulation training for undergraduate medical students. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2020;73(2):276-7.
43. Li Y, Li Z, Ammanuel S, Gillan D, Shah V. Efficacy of using a 3D printed lumbosacral spine phantom in improving trainee proficiency and confidence in CT-guided spine procedures. *3D Print Med*. 2018;4(1):7.
44. Sanchez Y, Trifanov DS, Kattapuram TM, Tao H, Prabhakar AM, Arellano RS, Uppot RN. Use of an Electromagnetic Navigation System on a Phantom as a Training Simulator for CT-Guided Procedures. *Journal of the American College of Radiology : JACR*. 2017;14(6):795-9.
45. Norman G. Data dredging, salami-slicing, and other successful strategies to ensure rejection: twelve tips on how to not get your paper published. *Advances in health sciences education : theory and practice*. 2014;19(1):1-5.

46. Eva KW, Regehr G. Self-assessment in the health professions: a reformulation and research agenda. *Academic medicine : journal of the Association of American Medical Colleges*. 2005;80(10 Suppl):S46-54.
47. Woolliscroft JO, Calhoun JG, Tenhaken JD, Judge RD. Harvey: the impact of a cardiovascular teaching simulator on student skill acquisition. *Medical teacher*. 1987;9(1):53-7.
48. Kneebone RL, Scott W, Darzi A, Horrocks M. Simulation and clinical practice: strengthening the relationship. *Med Educ*. 2004;38(10):1095-102.
49. Wenk M, Waurick R, Schotes D, Gerdes C, Van Aken HK, Popping DM. Simulation-based medical education is no better than problem-based discussions and induces misjudgment in self-assessment. *Advances in health sciences education : theory and practice*. 2009;14(2):159-71.
50. Jensen UJ, Jensen J, Olivecrona G, Ahlberg G, Lagerquist B, Tornvall P. The role of a simulator-based course in coronary angiography on performance in real life cath lab. *BMC medical education*. 2014;14:49.
51. Rall M, Manser T, Howard S. Key elements of debriefing for simulator training. *European Journal of Anaesthesiology*. 2000;17(8):516-7.
52. Won HJ, Kim N, Kim GB, Seo JB, Kim H. Validation of a CT-guided intervention robot for biopsy and radiofrequency ablation: experimental study with an abdominal phantom. *Diagn Interv Radiol*. 2017;23(3):233-7.
53. Kettenbach J, Kronreif G. Robotic systems for percutaneous needle-guided interventions. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2015;24(1):45-53.
54. Hecht R, Li M, de Ruiter QMB, Pritchard WF, Li X, Krishnasamy V, Saad W, Karanian JW, Wood BJ. Smartphone Augmented Reality CT-Based Platform for Needle Insertion Guidance: A Phantom Study. *Cardiovascular and interventional radiology*. 2020;43(5):756-64.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Victor Braun, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Simulation von CT-gestützten periradikulären Therapien an neuartigen anthropomorphen Phantomen – Evaluation von Simulationstraining und Interventionstechniken“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen

Victor Braun hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1: Braun VPB, Nunninger M, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Training of CT-guided Periradicular Therapy in a Realistic Simulation Environment - Evaluation and Recommendations for a Training Curriculum [published online ahead of print, 2020 Aug 14]. Acad Radiol. 2020;S1076-6332(20)30444-X.

Beitrag im Einzelnen:

1. Beteiligung an der Erstellung des Studiendesigns.
2. Ausführliche Literaturrecherche insbesondere zu den Themen „Simulation in der Radiologie“, „Ausbildung/Training in der interventionellen Radiologie“ sowie zu einzelnen Aspekten zur Simulation in der Medizin generell (Lerndynamiken, Risikopotential von Simulationstraining etc.).
3. Akquirierung der Studienteilnehmer, Terminplanung und -absprache.
4. Aufklärung der Studienteilnehmer, Anleitung der Interventionen zusammen mit Herrn Dr. med. Paul Jahnke.
5. Erheben der Checklistenparameter während der Durchführungen.
6. Messung der Parameter „Dauer“, „Anzahl der Bilder“ und „Winkelkorrektur“ anhand der gespeicherten DICOMs.
7. Übertragung der papierbasierten Ergebnisse der Fragebögen in Excel.
8. Anonymisierung der Ergebnisse der Studienteilnehmer.
9. Durchführung der statistischen Auswertungen, die zu Abb. 3, 4, 5, 6 und 7 sowie Tabelle 1 führten.
10. Selbständiges Verfassen des ersten Entwurfes des Manuskripts mit anschließender vielmaliger kritischer Besprechung und Verbesserung mit Dr. med. Paul Jahnke und Einarbeitung der Korrekturvorschläge der weiteren Coautoren.

Publikation 2: Nunninger M, Braun VPB, Ziegert M, Schwarz FB, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Scout-guided needle placement-a technical approach for dose reduction in CT-guided periradicular infiltration. Neuroradiology. 2020;62(3):341-346.

Beitrag im Einzelnen:

1. Datenakquise: Retrospektive Analyse von ca. 60 der 200 Fälle, durch die die Distanz a ermittelt wurde.
2. Beisteuerung von den Bildern 2a und 2c und Arrangement und Auswahl der Bilder für Abbildung 2.
3. Statistische Auswertung der 200 Werte für die Distanz a, die aus einer retrospektiven Analyse ermittelt wurden. Beisteuerung eines Vorschlags zur Datenvisualisierung, der mit zur Erstellung der Abbildung 4 beigetragen hat.
4. Kritisches Lesen des Publikationsentwurfs mit Anmerkungen und Änderungsvorschlägen.

Publikation 3: Jahnke P, Limberg FR, Gerbl A, Ardila Pardo GL, Braun VPB, Hamm B, Scheel M. (2017). Radiopaque Three-dimensional Printing: A Method to Create Realistic CT Phantoms. Radiology. 2017; 282(2), 569-575.

Beitrag im Einzelnen:

1. Literaturrecherche: Erweiterung der Literaturrecherche um einzelne Arbeiten.
2. Datenerfassung: Beteiligung am Phantomdruck, insbesondere an den Graustufenquadraten (wie im Methodikteil unter „Association of Gray Scales, Iodine Deposition, and Hounsfield Units“ geschildert). Wägung der Drucke. Vorbereitung und Durchführung der CT-Scans.
3. Datenauswertung/ Statistische Analyse: Auswertung der HU-Werte der Graustufenquadrate mithilfe von OsiriX/Horos (dadurch Erhalt der y-Werte in Abbildung 4). Vorschlag der exponentiellen Fitfunktion, die nach Abänderung für den Fit in Abbildung 4 angewandt wurde.
4. Manuskriptrevision

Unterschrift, Datum und Stempel des erstbetreuenden Hochschullehrers

Unterschrift des Doktoranden

Druckexemplare der ausgewählten Publikationen

Publikation 1

Braun VPB, Nunninger M, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Training of CT-guided Periradicular Therapy in a Realistic Simulation Environment - Evaluation and Recommendations for a Training Curriculum.

Acad Radiol. 2020;S1076-6332(20)30444-X [published online ahead of print, 2020 Aug 14].

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.07.021>

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32807605/>

Publikation 2

Nunninger M, **Braun VPB**, Ziegert M, Schwarz FB, Hamm B, Scheel M, Jahnke P.
Scout-guided needle placement-a technical approach for dose reduction in CT-guided periradicular infiltration.

Neuroradiology. 2020;62(3):341-346.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00234-019-02339-1>

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31838562/>

Publikation 3

Jahnke P, Limberg FR, Gerbl A, Ardila Pardo GL, **Braun VPB**, Hamm B, Scheel M. (2017). Radiopaque Three-dimensional Printing: A Method to Create Realistic CT Phantoms.

Radiology. 2017; 282(2), 569-575.

DOI: <https://doi.org/10.1148/radiol.2016152710>

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27626676/>

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Komplette Publikationsliste

Braun VPB, Nunninger M, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Training of CT-guided Periradicular Therapy in a Realistic Simulation Environment - Evaluation and Recommendations for a Training Curriculum [published online ahead of print, 2020 Aug 14]. Acad Radiol. 2020;S1076-6332(20)30444-X. doi:10.1016/j.acra.2020.07.021
Journal Impact Factor: 2.488

Nunninger M, **Braun VPB**, Ziegert M, Schwarz FB, Hamm B, Scheel M, Jahnke P. Scout-guided needle placement - a technical approach for dose reduction in CT-guided periradicular infiltration. Neuroradiology. 2020;62(3):341-346. doi:10.1007/s00234-019-02339-1
Journal Impact Factor: 2.238

Jahnke P, Limberg FR, Gerbl A, Ardila Pardo GL, **Braun VPB**, Hamm B, Scheel M. Radiopaque Three-dimensional Printing: A Method to Create Realistic CT Phantoms. Radiology. 2017; 282(2), 569-575. doi:10.1148/radiol.2016152710
Journal Impact Factor: 7.469

Danksagung

Großer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn PD Dr. med. Michael Scheel. Er hat mir auch über diese Doktorarbeit hinaus viele Türen und Tore geöffnet und zahlreiche lehrreiche Erfahrungen ermöglicht.

Vielen Dank den Medizinisch-technischen RadiologieassistentInnen des Campus Mitte, die mich bei technischen Fragen unterstützt haben.

Herzlichen Dank an alle aktuellen und ehemaligen Teammitglieder von PhantomX, in deren interdisziplinärem Umfeld ich mich sehr wohl gefühlt habe.

Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer meiner Doktorarbeit, Herrn Dr. med. Paul Jahnke. Einen engagierteren, tatkräftigeren, motivierenderen Betreuer hätte ich mir nicht wünschen können.

Vielen Dank den Medizinstudierenden und Radiologinnen und Radiologen der Charité, die als freiwillige Probanden an den Studien teilnahmen und ohne die diese Studien nicht möglich gewesen wären.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau und meinen Eltern für deren stete liebevolle Unterstützung.