

Aus der Klinik für Radiologie (Campus Benjamin Franklin)  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Evaluation von dosisoptimierten Protokollen für die  
Computertomographie-gestützte zervikale und lumbale  
periradikuläre Infiltrationstherapie

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Fabian Henry Jürgen Elsholtz

aus Berlin

Datum der Promotion: 23.06.2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract in deutscher Sprache</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract in englischer Sprache</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>5</b>
1.1. Zervikale und lumbale Schmerzsyndrome: Epidemiologie und Ursachen.....	5
1.2. Konzept der PRT .....	5
1.3. Bildgebende Steuerung und Strahlenschutz.....	6
1.4. Zielsetzung.....	7
<b>2 Methodik</b> .....	<b>7</b>
2.1. Allgemeines .....	7
2.2. Standardisierte Durchführung der PRT .....	7
2.3. Datenerhebung .....	8
2.4. Patientenkollektive und technische Parameter.....	8
2.5. Statistische Auswertung.....	10
<b>3 Ergebnisse</b> .....	<b>10</b>
3.1. Lumbale PRT: Abhängigkeit der Fluoroskopie-Dosis vom Patienten-BMI .....	10
3.2. Lumbale PRT: Weitere Dosisreduktion durch Einsatz von Spot Scanning zu Planungszwecken .....	11
3.3. Zervikale PRT: Transfer der Erkenntnisse aus den Studien zur lumbalen PRT ..	11
<b>4 Diskussion</b> .....	<b>12</b>
4.1. Limitationen.....	16
<b>5 Schlussfolgerung</b> .....	<b>17</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>18</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>20</b>
<b>Eidesstattliche Versicherung</b> .....	<b>21</b>
<b>Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen</b> .....	<b>22</b>
<b>Druckexemplare der ausgewählten Publikationen</b> .....	<b>23</b>
<b>Lebenslauf</b> .....	<b>49</b>
<b>Komplette Publikationsliste</b> .....	<b>50</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>52</b>

## **Abstract in deutscher Sprache**

**Einführung:** Die Computertomographie-gestützte periradikuläre Infiltrationstherapie (PRT) hat sich als effektive symptomatische Therapieoption zur Behandlung Radikulopathie-assoziiertes Schmerzsyndroms etabliert. Hierbei werden über eine vor dem Neuroforamen platzierte Kanüle Lokalanästhetika und Glukokortikoide appliziert. Da die Strahlenexposition für den Patienten und den interventionellen Radiologen fortwährend kritisch diskutiert wird, wurden in den hier zusammengefassten drei Publikationen dosisoptimierte Protokolle sowohl für zervikale als auch für lumbale Interventionen evaluiert.

**Methodik:** Die Interventionen folgten einem standardisierten Ablauf. In den Studiengruppen wurde nach Akquisition eines lateralen Scanograms eine Planung mit vier Einzelschichtaufnahmen (Spot Scanning) und anschließend die fluoroskopische Nadelpositionierung durchgeführt. Die Fluoroskopie sah bei aktiviertem iterativen Rekonstruktionsalgorithmus eine Basiseinstellung mit einer Röhrenspannung von 80 kV (zervikale Wirbelsäule) oder 100 kV (lumbale Wirbelsäule) und einem Röhrenstrom-Zeit-Produkt von 5 mAs mit der Möglichkeit um eine Erhöhung auf 10 mAs vor ("bottom-up-Strategie"). Zunächst wurde die Abhängigkeit der lumbalen Fluoroskopie-Dosis vom Body Mass Index der Patienten untersucht, anschließend die Dosis nach Einführung von Spot Scanning zu Planungszwecken mit einer zuvor in der Institution genutzten lumbalen Volumenakquisition verglichen. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten wurden dann in die Entwicklung eines dosisoptimierten Protokolls für die zervikale PRT übertragen. Die Qualitätskontrolle erfolgte neben der Bilddokumentation des technischen Erfolges durch Quantifizierung des Schmerzempfindens der Patienten unmittelbar vor und 6 Wochen nach der Intervention auf einer numerischen Rating-Skala.

**Ergebnisse:** Während der lumbalen PRT war nur in der Gruppe der Patienten mit einem BMI  $\geq 30$  kg/m<sup>2</sup> eine Erhöhung des fluoroskopischen Röhrenstrom-Zeit-Produktes auf 10 mAs bei 7 von 15 Patienten (47 %) notwendig. Zervikal fand dieselbe Erhöhung bei 5 von 82 Patienten (6 %) im Segment HWK 6/7 Anwendung. Die Gesamtdosis der Interventionen belief sich auf ein medianes Dosis-Längen-Produkt von 1,80 mGy\*cm (zervikale Wirbelsäule) und 3,20 mGy\*cm (lumbale Wirbelsäule), diese verteilte sich mit jeweils 0,80 mGy\*cm auf das Spot Scanning sowie mit 0,95 mGy\*cm und 2,40 mGy\*cm auf die Fluoroskopie. Die Interventionen konnten mit 7 % und 36 % der Gesamtdosis der Vergleichsprotokolle aus der eigenen Institution ( $p < 0,05$ ) sowie mit 22 % und 65 % der Gesamtdosis aus der Literatur erfolgreich durchgeführt werden. Die erhobene mediane

Schmerzreduktion zeigte zwischen Studien- und Vergleichsgruppen keinen signifikanten Unterschied (im Median 2 Punkte).

**Schlussfolgerung:** Durch Einführung von Spot Scanning zu Planungszwecken und Einsatz eines niedrigen Röhrenstrom-Zeit-Produktes während der Fluoroskopie konnten erhebliche Dosisreduktionen gegenüber Vergleichsprotokollen aus der eigenen Institution und der Literatur erreicht werden. Dabei war die Effektivität der Interventionen im Sinne einer erreichten Schmerzlinderung gegenüber den früheren, institutionseigenen Protokollen äquivalent.

*397 Worte*

## Abstract in englischer Sprache

**Introduction:** Computed-tomography-guided periradicular infiltration treatment (PRT) has become an accepted therapeutic option for radiculopathy-associated pain syndromes. Local anesthetics and glucocorticoids are administered via a cannula placed in next to the neuroforamen. Since radiation exposure of patients and interventional radiologists is an ongoing concern, dose-optimized protocols for both cervical and lumbar interventions were evaluated in the three publications summarized here.

**Methods:** Standardized interventional protocols were used including acquisition of a lateral scanogram, planning with four single-slice images (spot scanning), and subsequent fluoroscopic needle positioning. With iterative reconstruction activated, fluoroscopy was carried out with a tube voltage of 80 kV (cervical spine) or 100 kV (lumbar spine) and a tube current-time product of 5 mAs with the option of an increase to 10 mAs ("bottom-up strategy"). First, the dependence of the lumbar fluoroscopy dose on patients' body mass index (BMI) was investigated, and then the dose after introduction of spot scanning for planning was compared with that of a lumbar volume acquisition previously used in our department. The results of these investigations served to develop a dose-optimized protocol for cervical PRT. Quality control included image documentation of technical success and quantification of subjective pain on a numerical rating scale immediately before and 6 weeks after the intervention.

**Results:** In 7 of 15 patients (47 %) only with a BMI of 30 kg/m<sup>2</sup> or greater, the fluoroscopic tube current-time product had to be increased to 10 mAs during lumbar PRT. The same increase was necessary in 5 of 82 patients (6 %) treated in the C 6/7 cervical segment. The total median dose-length product was 1.80 mGy\*cm (cervical spine) and 3.20 mGy\*cm (lumbar spine) with 0.80 mGy\*cm for spot scanning (both) and 0.95 mGy\*cm and 2.40 mGy\*cm, respectively, for fluoroscopy. Interventions were successfully completed with 7 % and 36 % of the total dose of our department's earlier protocols ( $p < 0.05$ ) and with 22 % and 65 % of the total dose reported in the literature. Median pain reduction was not statistically significantly different between study patients and controls (median reduction of 2 points).

**Conclusion:** Introduction of spot scanning for planning and use of a low tube current-time product during fluoroscopy significantly reduced dose exposure of spinal interventions compared to earlier protocols from our department and published protocols. The

effectiveness of the interventions in terms of pain relief was equivalent for low-dose protocols and earlier standard protocols of our department.

*399 words*

# 1 Einführung

## 1.1. Zervikale und lumbale Schmerzsyndrome: Epidemiologie und Ursachen

Wirbelsäulenassoziierte Schmerzsyndrome zeigen eine stetig steigende Prävalenz und stellen eine hohe sozioökonomische Belastung dar [1]. Die multifaktoriellen Ursachen liegen häufig in Kombination vor und umfassen unter anderem akute und chronische Ereignisse im Rahmen von degenerativen Veränderungen, aber auch Lifestyle-Faktoren wie Übergewicht und Bewegungsmangel ohne eindeutigen Nachweis einer relevanten strukturellen Pathologie [2, 3]. Zervikale Radikulopathien sind in den meisten Fällen durch Bandscheibenprotrusionen bedingt, lumbal hingegen zeigt sich eine gleichmäßigere Verteilung ossärer, ligamentärer und erneut diskaler Ursachen [4]. Bei vorliegender Nervenaffektion werden spinale von radikulären Symptomen unterschieden.

## 1.2. Konzept der PRT

Im Falle einer zugrundeliegenden Radikulopathie hat sich die periradikuläre Infiltrationstherapie (PRT) als symptomatische Behandlungsoption etabliert und wird nach Ausschöpfung konservativer Therapieschemata wie Schmerzmedikation und Physiotherapie supportiv mit diesen angewandt [5, 6]. Insbesondere kann durch die PRT eine Schmerzlinderung erreicht werden, die dem Patienten erst eine gezielte physiotherapeutische Behandlung ermöglicht. Dabei hat sich die PRT vor allem bei akuten, nachgeordnet bei chronischen Schmerzsyndromen als effektiv erwiesen [7]. Während der Intervention werden über eine unmittelbar vor dem Neuroforamen und somit im Bereich des Spinalnerven positionierte Kanüle zuvor ausgewählte Medikamente appliziert, welche sich um die betroffene Nervenwurzel verteilen sollen. Bei der diagnostischen PRT wird ausschließlich Lokalanästhetikum appliziert und das kurzfristige Therapieansprechen evaluiert, während bei der therapeutischen PRT zusätzlich ein Glukokortikoid appliziert wird, welches durch die antiinflammatorische Wirkung ein Abschwellen des beteiligten Gewebes und somit eine mittel- und längerfristige Beschwerdelinderung erzielen soll.

## 1.3. Bildgebende Interventionssteuerung und Strahlenschutz

Die PRT kann sowohl mit als auch ohne bildgebende Steuerung erfolgen, wobei mit der Durchleuchtung, der Computertomographie (CT), der Magnetresonanztomographie (MRT) und der Sonographie sämtliche radiologisch-bildgebenden Verfahren evaluiert

wurden [8, 9]. Schnittbildgebende Modalitäten bieten den Vorteil einer exakten Planung anhand des Zugangsweges sowie der Ziel- und Risikostrukturen, wobei Sonographie und MRT in der Darstellung von Weichgewebe und das CT in der Darstellung von ossären Strukturen überlegen sind. Die Durchleuchtung kann als projektionsradiographische Technik nur eine orientierende Interventionsführung bieten. Unter Beachtung der unterschiedlichen Verfügbarkeit und Kosteneffektivität hat sich die CT als dominante Interventionsmodalität von Seiten der Radiologie etabliert. In diesem Zusammenhang lässt die Anwendung ionisierender Strahlung seit jeher Bedenken aufgrund von möglichen stochastischen und deterministischen Strahlenwirkungen aufkommen [10]. Dabei steht neben dem Patienten auch der wiederholt exponierte interventionelle Radiologe im Fokus der Diskussion, zuletzt insbesondere im Zusammenhang mit der Kataraktogenese [11, 12]. Neben einer sorgfältigen Indikationsstellung zur möglichen Vermeidung unnötiger Interventionen kann durch Optimierung des Untersuchungsprotokolls eine Dosisreduktion erreicht werden. Gängige Dosismessgrößen wie die CTDI (Computed Tomography Dose Index) und DLP (Dose Length Product/ Dosis-Längen-Produkt) quantifizieren die Exposition durch die Röhrenstrahlung und werden hauptsächlich durch die Parameter Scanstrecke, Röhrenstrom, Röhrenspannung und Röhrenrotationszeit bestimmt. Das DLP errechnet sich aus der Multiplikation des CTDI in Milligray (mGy) mit der Scanstrecke oder bei Einzelaufnahmen mit der Schichtdicke in Zentimetern (mGy\*cm). Die effektive Dosis bezieht das unterschiedliche Risiko der Organe für stochastische Strahlenwirkungen mit ein und erhält die Einheit Sievert (Sv). Diese Größe kann durch Multiplikation des DLP mit für die jeweilige Körperregion spezifischen Konversionsfaktoren errechnet werden.

Gegenüber der standardmäßigen Bildrekonstruktion mit gefilterter Rückprojektion (Filtered Back Projection, FBP) hat die Einführung von iterativen Rekonstruktionsalgorithmen die Möglichkeiten zur Modulation dieser Parameter mit dem Ziel der Dosisreduktion deutlich erweitert. Diese Algorithmen reduzieren das Bildrauschen und erlauben somit das Aufrechterhalten der notwendigen Bildqualität trotz Dosisreduktion [13, 14].

Die vollständige CT-gestützte PRT besteht aus den zwei Schritten Akquisition von Planungsaufnahmen und Durchführung der eigentlichen Intervention. Während bei der Planung ein definiertes Areal mit allen Leitstrukturen des zu behandelnden Segmentes zu erfassen ist, wird bei der Intervention mittels fluoroskopischer Einzelaufnahmen der Fortschritt der Nadelpositionierung verfolgt. Das Verbleiben des interventionellen Radiologen seitlich des CT-Scanners bietet die Vorteile eines flüssigen Interventionsablaufes und der



kontinuierlichen Patientenkontrolle, hat jedoch den Nachteil der eigenen Strahlenexposition.

#### 1.4. Zielsetzung

Im Sinne dieser Überlegungen war das übergeordnete Ziel der hier aufgeführten Studien die Evaluation von dosisoptimierten Protokollen für die CT-gestützte PRT unter Gewährleistung eines sicheren Ablaufes und eines erfolgreichen Abschließens der Interventionen. Zunächst sollten getrennte Studien zu den lumbalen Protokollen für Fluoroskopie und Planung durchgeführt und deren Erkenntnisse anschließend auf ein vollständiges Protokoll für die zervikale PRT übertragen werden.

## 2 Methodik

### 2.1. Allgemeines

Ein Ethikvotum für die Durchführung der drei retrospektiven Studien wurde bei der institutionellen Ethikkommission eingeholt (Antragsnummer EA2/038/17).

### 2.2. Standardisierte Durchführung der PRT

Unabhängig vom benutzten Protokoll wurden die Interventionen in einem einheitlichen Ablauf durchgeführt. Im Falle einer zervikalen PRT wurde der Patient auf dem Rücken gelagert und der Kopf leicht zur nicht betroffenen Seite rotiert, um unter Öffnung des Neuroforamens und Schonung der vasalen Risikostrukturen einen ventrolateral-transforaminalen Zugangsweg zu ermöglichen. Bei lumbalen Interventionen hingegen wurde der Patient auf dem Bauch gelagert und ein dorsolateral-transforaminaler Zugangsweg gewählt. Nach Akquisition eines ausschließlich lateralen Scanograms wurden je nach Protokoll definierte Planungsaufnahmen akquiriert, in denen der durchführende interventionelle Radiologe eine geeignete Schicht entsprechend der initialen Tischpositionierung für die Fluoroskopie wählte. Nach Hautdesinfektion und lokaler Anästhesie wurde im Falle der lumbalen Wirbelsäule eine 19,5 G beziehungsweise bei zervikalen Segmenten eine 22 G Spinalkanüle unmittelbar vor dem Neuroforamen platziert, die Position der Nadelspitze konnte dabei durch das Vorliegen eines Nadelspitzenartefaktes nachgewiesen werden. Anschließend wurde eine Kombination aus Lokalanästhetikum (2 ml Bupivacain, Carbostesin 0,5%, AstraZeneca GmbH, Wedel, Deutschland) und Kontrastmittel (0,5 ml

Hexabrix 320, Guerbet, Roissy, Frankreich) appliziert, um die zu erwartende Verteilung des nachfolgend applizierten Glukokortikoids (zervikale PRT: 1 ml Dexamethason, Lipo-talon, Merckle Recordati, GmbH, Ulm, Deutschland; lumbale PRT: 1 ml Triamcinolon, Volon A, Dermapharm AG, Grünwald, Deutschland) zu dokumentieren.

### 2.3. Datenerhebung

Für sämtliche Studien relevante Parameter waren die während der Intervention genutzten Einstellungen der Röhrenspannung (in Kilovolt, kV), des Röhrenstroms (in Milliampere, mA) und der Röhrenrotationszeit (in Sekunden, s), wobei letztere als Röhrenstrom-Zeit-Produkt (Milliampere-Sekunden, mAs) zusammengefasst werden können sowie die Anzahl der fluoroskopischen Akquisitionen. Neben Geschlecht, Alter und Body Mass Index (BMI) der Patienten war eine Ermittlung des subjektiven Schmerzempfindens Teil der Datenerfassung. Anhand einer numerischen Rating-Skala (NRS) von 0 (keine Schmerzen) bis 10 (stärkste vorstellbare Schmerzen) wurden die Patienten unmittelbar vor der Intervention und 6 Wochen später befragt.

Zur ergänzenden Berechnung der effektiven Dosis wurde bei lumbalen Interventionen der für abdominelle Untersuchungen akzeptierte Konversionsfaktor von 0,20 und für zervikale Interventionen der für dortige Untersuchungen akzeptierte Konversionsfaktor von 0,0057 angewendet [15].

### 2.4. Patientenkollektive und technische Parameter

Eingeschlossen in die Evaluation des lumbalen Fluoroskopieprotokolls wurden 79 Patienten mit klinisch gesicherter lumbaler Radikulopathie, die mit insgesamt 183 einseitigen Interventionen behandelt worden waren. Gegenstand dieser Studie war ausschließlich die Fluoroskopie, genutzt wurde ein 80-Zeilen-Scanner (Toshiba Aquilion Prime, Ottawa, Japan) mit dem aktivierten iterativen Rekonstruktionsalgorithmus "Adaptive Iterative Dose Reduction 3D" (AIDR 3D). Die Fluoroskopie wurde mit einer Grundeinstellung von 100 kV und 5 mAs (10 mA bei 0,5 s Röhrenrotationszeit) durchgeführt. Nach Ermessen des interventionellen Radiologen konnte bei unzureichender Abgrenzbarkeit der Nadelspitze oder der anatomischen Leitstrukturen das Röhrenstrom-Zeit-Produkt um 5 mAs erhöht werden. Die Strategie, mit sehr niedrigen Werten zu beginnen und diese erst gegebenenfalls zu erhöhen, wird als "bottom-up-Strategie" bezeichnet.

Eingeschlossen in die Evaluation des lumbalen Planungsprotokolls wurden 85 Patienten mit klinisch gesicherter lumbaler Radikulopathie, die jeweils einmalig und einseitig mittels PRT behandelt worden waren. Sämtliche Untersuchungen wurden am bereits spezifizierten 80-Zeilen-Scanner durchgeführt. Bei 63 Patienten der Studiengruppe erfolgte die Planung mittels sogenanntem "Spot Scanning". Dies bedeutet eine Akquisition von vier Einzelschichtaufnahmen in einem definierten Volumen von 4 cm mit jeweils 100 kV und 10 mAs bei 1 mm Schichtdicke. In der 22 Patienten umfassenden Vergleichsgruppe wurde zu Planungszwecken eine Volumenakquisition über eine feste Strecke von 4 cm mit 120 kV und 20 mAs durchgeführt. Das zuvor beschriebene Protokoll der Fluoroskopie wurde übernommen, sodass die Interventionen auch als Gesamtes ausgewertet werden konnten.

Eingeschlossen in die Evaluation des vollständigen Protokolls für die zervikale Wirbelsäule wurden 183 Patienten mit klinisch gesicherter zervikaler Radikulopathie, die jeweils einmalig und einseitig mittels dortiger PRT behandelt worden waren. 82 Patienten der Studiengruppe wurden am bereits spezifizierten 80-Zeilen-Scanner behandelt. Im Vergleich mit der lumbalen PRT unterschied sich das Protokoll lediglich in der Fluoroskopie, während jener 80 kV statt 100 kV eingestellt waren. 101 Patienten der Vergleichsgruppe wurden an einem 64-Zeilen-Scanner (Siemens Somatom Definition, Dual Source Scanner der ersten Generation, Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland) durchgeführt. Auf diesem Gerät stand ausschließlich die Bildrekonstruktion mittels gefilterter Rückprojektion zur Verfügung. Die vom interventionellen Radiologen bezüglich der Länge individuell definierte Spiralakquisition wurde bei 0,75 mm Schichtdicke mit 100 kV und einer automatischen Röhrenstrommodulation durchgeführt, bei welcher die Software des Computertomographen anhand des lateralen Scanograms und den dort gemessenen Schwächungen ein variables Röhrenstromzeitprodukt einsetzt. Das Fluoroskopieprotokoll sah eine Einstellung von 100 kV, 28 mAs und 5 mm Schichtdicke vor. 54 Interventionen der Studiengruppe wurden von einem Facharzt (A) mit 13 Jahren Berufserfahrung durchgeführt, 28 von einem Assistenzarzt mit drei Jahren Berufserfahrung (B). In der Vergleichsgruppe nahm derselbe Facharzt (A) 69 Interventionen vor, während einer weiterer Assistenzarzt (C) mit ebenfalls drei Jahren Berufserfahrung 32 Interventionen übernahm.

## 2.5. Statistische Auswertungen

Die statistische Auswertung erfolgte unter Nutzung von R (Version 3.2.3., The R Foundation for Statistical Computing, Wien, Österreich), wobei zur Erstellung der Diagramme auf das Paket "lattice" zurückgegriffen wurde. Statistische Signifikanz wurde stets bei p-Werten  $< 0,05$  angenommen.

In allen Patientenkollektiven wurde eine Normalverteilung der Daten mittels Shapiro-Wilk-Test ausgeschlossen. Der nicht-parametrische Spearman Rangkorrelationskoeffizient wurde zur Berechnung der statistischen Abhängigkeit von DLP und BMI sowie von fluoroskopischer Akquisitionsanzahl und BMI angewendet. Bezugnehmend auf Cohen wird die Korrelation zweier Parameter bei einem Koeffizienten kleiner als 0,3 als "gering" interpretiert, "mittel" bei Koeffizienten zwischen 0,3 und kleiner als 0,5 und "hoch" bei Koeffizienten größer als 0,5 [16]. Mit Ausnahme der Anwendung des Chi-Quadrat-Tests bei Betrachtung der Geschlechterverteilung wurde zur Berechnung der Signifikanz der Unterschiede hinsichtlich eines betrachteten Parameters zwischen zwei Gruppen der parameterfreie Wilcoxon-Rangsummentest angewendet.

## 3 Ergebnisse

### 3.1. Lumbale PRT: Abhängigkeit der Fluoroskopie-Dosis vom Patienten-BMI

*Elsholtz FHJ, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM*

*Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.*

*Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370*

Für die Interventionen wurden im Median 7,33 fluoroskopische Akquisitionen benötigt. Anhand des BMI wurde das Patientenkollektiv nach den von der WHO vorgegebenen Grenzwerten in drei Gruppen eingeteilt:  $< 25 \text{ kg/m}^2$ ,  $\geq 25 \text{ kg/m}^2$  und  $< 30 \text{ kg/m}^2$ ,  $\geq 30 \text{ kg/m}^2$  [17]. Der mediane BMI des Patientenkollektivs betrug  $27 \text{ kg/m}^2$ . Eine signifikant (p-Wert = 0,01,  $p < 0,01$ ,  $p < 0,01$ ) niedrigere benötigte Dosis wiesen die Gruppen 1 (2,41 mGy\*cm) und 2 (2,31 mGy\*cm) für sich und in Kombination gegenüber Gruppe 3 (3,37 mGy\*cm) auf. Für die Gruppen 1 und 2 wurde jeweils eine Korrelation von  $r = 0,11$  berechnet ( $p = 0,56$  und  $0,54$ ). In Gruppe 3 zeigten DLP und BMI eine Korrelation von  $r = 0,61$  ( $p: 0,02$ ) auf. Die Anzahl der fluoroskopischen Akquisitionen und der BMI korrelierten über alle Gruppen mit  $r = -0,04$  ( $p = 0,33$ ). Eine einfache Erhöhung des Röhrenstrom-Zeit-Produktes um 5 mAs war bei 7 von 15 Patienten (47 %) in Gruppe 3 notwendig,

jedoch bei keinem Patienten in den Gruppen 1 und 2. Keine Protokollanpassung war dementsprechend bei insgesamt 72 Patienten (91 %) der Studie notwendig.

### 3.2. Lumbale PRT: Weitere Dosisreduktion durch Einsatz von Spot Scanning zu Planungszwecken

**Elsholtz FHJ, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM**

*Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.*

*La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712*

Der mediane BMI der eingeschlossenen Patienten betrug 28 kg/m<sup>2</sup>. Die mediane Gesamtdosis belief sich in der Studiengruppe auf 3,20 mGy\*cm (entsprechend 0,005 mSv effektive Dosis) gegenüber 8,90 mGy\*cm (0,014 mSv) in der Vergleichsgruppe ( $p < 0,01$ ), dies entspricht einem Anteil von 36 %. Auf die Planung entfielen dabei im Median 0,80 mGy\*cm gegenüber 6,50 mGy\*cm ( $p < 0,01$ ), die Fluoroskopie trug im Median 2,40 mGy\*cm gegenüber 2,35 mGy\*cm bei ( $p = 0,79$ ). Demzufolge konnte der Beitrag der Planung zur Gesamtdosis von 73 % in der Vergleichsgruppe auf 25 % in der Studiengruppe gesenkt werden. Das Spot Scanning war bei jeder durchgeführten Intervention erfolgreich, musste also aufgrund einer möglicherweise unvollständigen Darstellung der Zielstrukturen nicht wiederholt werden. Die Differenz auf der NRS betrug in beiden Gruppen - 2 Punkte ( $p = 0,68$ ).

### 3.3. Zervikale PRT: Transfer der Erkenntnisse aus den Arbeiten zur lumbalen PRT

**Elsholtz FHJ, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM**

*Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.*

*RöFo, 2018; 191(1):54-61*

Der mediane BMI der eingeschlossenen Patienten betrug 27 kg/m<sup>2</sup>. Die Interventionen wurden mit einer medianen Gesamtdosis von 1,80 mGy\*cm (entsprechend 0,01 mSv effektive Dosis) in der Studiengruppe und 24,30 mGy\*cm (0,13 mSv) in der Vergleichsgruppe ( $p < 0,01$ ) durchgeführt, dies entspricht einem Anteil von 7 %. Auf die Planung entfielen dabei im Median 0,80 mGy\*cm gegenüber 22,00 mGy\*cm ( $p < 0,01$ ), die Fluoroskopie trug im Median 0,95 mGy\*cm gegenüber 1,70 mGy\*cm zur Gesamtdosis bei ( $p$

< 0,01). Eine Erhöhung des Röhrenstrom-Zeit-Produktes wurde bei 5 von 82 Patienten (6 %) vorgenommen, um eine adäquate Abgrenzbarkeit des Neuroforamens zu erreichen. Sämtliche fünf Modifikationen waren notwendig bei Interventionen im Segment HWK 6/7, 21 Intervention wurden in diesem Segment ohne Erhöhung mit der Basiseinstellung 5 mAs abgeschlossen. Hinsichtlich der Gesamtdosis konnten weder in der Studien- noch in der Vergleichsgruppe signifikante Unterschiede zwischen den von Facharzt A und den von den Assistenzärzten B und C durchgeführten Interventionen gezeigt werden. Die mediane Differenz auf der NRS betrug in der Studiengruppe -3 Punkte gegenüber -2 Punkten in der Vergleichsgruppe, wobei dieser Unterschied der Mediane nicht signifikant war ( $p = 0,80$ ).

#### **4 Diskussion**

Das Ziel der hier vorgestellten Publikationen war die Evaluation von dosisoptimierten Protokollen für die CT-gestützte PRT. Durch Einführung der neuen Protokolle konnte gegenüber den Vergleichsprotokollen eine signifikante Dosisreduktion erreicht werden.

Die Qualitätskontrolle wurde zum einen über die sichere Durchführbarkeit der Interventionen und zum anderen durch die Quantifizierung des Schmerzempfindens durch Erhebung auf der NRS unmittelbar vor und 6 Wochen nach erfolgter Intervention gewährleistet. In allen Arbeiten konnte im Vergleich zwischen Studien- und Vergleichsgruppen eine mindestens äquivalente Schmerzreduktion nachgewiesen werden.

Gemäß dem "ALARA-Prinzip" ("as low as reasonably achievable") sollten sämtliche Anwendungen ionisierender Strahlung stets hinsichtlich der Möglichkeit einer weiteren Dosisreduktion evaluiert werden, ohne dabei diagnostische Aussagekraft oder therapeutische Effektivität einzubüßen. In diesem Sinne leisten die hier evaluierten Protokolle einen entscheidenden Beitrag gegenüber den Ergebnissen vorhergegangener Studien. Für diesen Vergleich mit der aktuellen Literatur wurde ein Veröffentlichungsdatum ab einschließlich 2012 als akzeptabel erachtet, da in älteren Publikationen analog zu dem früheren, institutseigenen Vergleichsprotokoll für die zervikale PRT die Nutzung moderner Computertomographen mit den entsprechend neuen Techniken zur Dosisreduktion nicht erwartet werden konnte.

Für lumbale Interventionen reicht unter diesen Maßstäben die Range der Gesamtdosis von 4,94 mGy\*cm bis 89,60 mGy\*cm [18, 19]. Zunächst führten Amrhein et al. eine Studie durch, welche die Planung mittels Spiralakquisition untersuchte [20]. In deren Studiengruppe wurde dabei die automatische Röhrenstrommodulation deaktiviert und abhängig

vom anteroposterioren Diameter des Patienten im Scanogram eine Einstellung mit 50 mA oder 100 mA genutzt. Mit dieser Änderung konnte eine Dosisreduktion von 313,1 auf 27,9 mGy\*cm erreicht werden. Artner et al. publizierten ein Niedrigdosisprotokoll mit einer mittleren Gesamtdosis von 13,87 mGy\*cm [21]. Sie nutzten zu Planungszwecken eine Spiralakquisition mit verringerter Scanstrecke bei 80 kV und 80 mA, um während der Fluoroskopie auf 50 mA bei weiterhin 80 kV zu reduzieren. Eine wesentliche Limitation dieser Studie stellt jedoch das Ausschlusskriterium des Patientenkollektivs mit einem BMI größer als 30 kg/m<sup>2</sup> dar. Anhand der ersten von uns vorgestellten Studie konnten wir zeigen, dass die Anwendbarkeit eines dosisoptimierten Protokolls insbesondere in dieser Kohorte evaluiert werden sollte. Die bis dahin niedrigste Gesamtdosis hat Paik in einem Protokoll für die lumbale ESI (Epidural Space Injection) veröffentlicht, welche im Ablauf der PRT ähnelt, jedoch statt des Spinalnerven den Epiduralraum für die Medikamentenapplikation anvisiert [18]. Zudem wurde von Paik der in der aktuellen Literatur seltener verfolgte interlaminare statt dem in hier zusammengefassten Publikationen vorgestellten transforaminalen Zugangsweg angewendet [22]. Paik nutzte zu Planungszwecken ebenfalls Spot Scanning mit drei Einzelschichtaufnahmen bei 130 kV, 30 mAs und 2,5 mm Schichtdicke, und wandte dieselben Parameter auch während der Fluoroskopie an. Die resultierende durchschnittliche Gesamtdosis betrug dabei 4,94 mGy\*cm, wobei 1,24 mGy\*cm auf das Spot Scanning und 3,71 mGy\*cm auf die Fluoroskopie entfielen. In seiner Studie griff Paik zudem auf vorangegangene schnittbildgebende Untersuchungen (CT und MRT) zu Planungszwecken zurück.

In der Literatur liegen nur wenige Veröffentlichungen vor, welche die Dosisreduktion bei der zervikalen PRT oder ESI thematisieren. Kranz et al. veröffentlichten eine Studie zur Technik und Sicherheit bei der zervikalen interlaminaren ESI, in der für die Fluoroskopie ein Röhrenstrom zwischen 30 mA und 150 mA angewendet wurde [23]. Eine Gesamtdosis wird von Kranz et al. nicht benannt. In einer weiteren Studie nutzte erneut Paik ebenso wie in der eigenen, dargelegten Publikation zur zervikalen PRT den ventrolateral-transforaminalen Zugangsweg und bezeichnete die Intervention entsprechend als TFESI [24]. Aus technischer Sicht ist dieses Vorgehen jedoch dasselbe wie bei der PRT. Eine Ausbreitung des Kontrastmittels kann zwar gelegentlich bis nach intraspinal in den Epiduralraum beobachtet werden, sicher erreicht werden kann über den transforaminalen Zugangsweg jedoch nur der Spinalnerv, welcher nicht im gesamten Verlauf vom Epiduralraum umgeben wird [25]. Erneut wurde zu Planungszwecken nach Akquisition eines lateralen Scanograms auf Spot Scanning mit ein bis drei Akquisitionen bei 120 kV und 40

mAs zurückgegriffen, und die gleichen Parameter wurden auch für die Fluoroskopie genutzt. Die resultierende mediane Gesamtdosis betrug dabei 7,92 mGy\*cm, wobei auf das Spot Scanning 1,32 mGy\*cm und 6,60 mGy\*cm auf die Fluoroskopie entfielen.

Zusammenfassend lassen sich die Interventionen unter Anwendung der eigenen, vorgestellten Protokolle mit 22 % (zervikale Wirbelsäule) beziehungsweise 65 % (lumbale Wirbelsäule) der Gesamtdosis der bis dahin führenden Protokolle aus der Literatur durchführen.

Die wesentliche Dosisreduktion konnte sowohl in den Protokollen für die zervikale als auch die lumbale PRT durch jeweils eine grundlegende Änderung in der Planung und der Fluoroskopie realisiert werden. Spot Scanning reduziert drastisch die Gesamtzahl der Bilder gegenüber der Akquisition einer variablen Spiralscanstrecke oder auch einem definierten Volumen erheblich. Die Reduktion des Röhrenstrom-Zeit-Produktes auf 5 mAs war die niedrigstmögliche Einstellung des genutzten Computertomographen und liegt weit unter den zuvor genutzten oder in der Literatur vorgeschlagenen Werten. Entscheidend ist dabei der Grundgedanke, dass für eine sichere Durchführung der Intervention keine Bildqualität einer CT-Untersuchung für diagnostische Zwecke vonnöten ist. Während die ossären Leitstrukturen im umgebenden Weichteilgewebe ohnehin zum Hochkontrast gehören, bedarf die Abgrenzbarkeit der zervikalen Risikostrukturen Arteria carotis communis/interna, Vena jugularis interna und Arteria vertebralis zwar einer Grunderfahrung in CT-Diagnostik, allerdings werden diese Strukturen bereits durch den ventrolateralen Zugangsweg bei Kopfwendung geschont. Darüber hinaus bleibt das Protokoll durch Implementation der "bottom-up-Strategie" flexibel gegenüber komplexeren Interventionsverläufen, bei denen bessere Abgrenzbarkeit der Strukturen durch geringeres Bildrauschen gewünscht wird oder gegenüber limitierter Bildqualität durch größere durchdringende Diameter und Instrumentieren in Segmenten mit viel Knochengewebe. Bei der Einführung des Protokolls für die zervikale PRT hat sich die Hypothese bestätigt, dass der schmalere Körperdiameter im Vergleich mit dem Abdomen und Becken eine geringere Röhrenspannung von 80 kV erfordert. Diese Herangehensweisen könnten auch Grundlage für die Entwicklung dosisoptimierter Protokolle für weitere CT-gestützte Interventionstypen wie Drainagenanlagen oder Punktionen sein.

In Anbetracht des ALARA-Prinzips sind auch weitere Möglichkeiten der Dosisreduktion zu diskutieren. So sollte evaluiert werden, ob Spot Scanning statt mit vier Einzelschichtaufnahmen auch mit drei, zwei oder sogar nur einer Einzelschichtaufnahme erfolgreich umgesetzt werden kann. Hier erscheint es möglich, mit einer Einzelschichtaufnahme auf



der erwarteten Segmenthöhe zu beginnen und im Falle einer nicht zufriedenstellenden Darstellung schrittweise weitere Einzelschichtaufnahmen zu nutzen. Auch während der Fluoroskopie besteht Potential für weitere Dosisreduktion wie durch Ausnutzen einer sektoriellen Röhrenabschaltung auf der Standseite des interventionellen Radiologen über z.B. 90°, also entsprechend einem Viertel der Gesamtrotation. Dies würde einerseits die linear mit dem Röhrenstrom-Zeit-Produkt steigende Dosis um entsprechend ein Viertel reduzieren und andererseits auch den interventionellen Radiologen zunehmend vor der zum Großteil entgegen der Primärstrahlung gerichteten Streustrahlung schützen.

In den Vergleichsgruppen wurde während der Fluoroskopie der iterative Rekonstruktionsalgorithmus AIDR 3D mit dem mittleren gewählten Level "standard" aktiviert. Die wählbaren Level "mild", "standard" und "strong" spiegeln eine entsprechend zunehmende Anzahl der durchgeführten Iterationsschleifen wider. Nach Meinung der eigenen Arbeitsgruppe bot das gewählte Level "standard" das beste Verhältnis aus Reduktion des Bildrauschens und nachteiliger Weichzeichnung der ossären Leitstrukturen und des Nadelspitzenartefaktes bei Unterdrückung der Kantenbetonung. Des Weiteren sind zunehmende Anzahlen von Iterationsschleifen auch mit mehr Rechenzeit verbunden und können somit einem flüssigen Interventionsablauf abträglich sein. Der Einsatz von AIDR 3D geschah mit der Intention bei den im Vergleich zu den Planungsaufnahmen erneut reduzierten Parametern Röhrenspannung und Röhrenstrom-Zeit-Produkt durch Reduktion des Bildrauschens weiterhin eine adäquate Bildqualität zu gewährleisten. Im Rahmen einer zeitlich nach den hier vorgestellten Publikationen veröffentlichten Studie konnte jedoch gezeigt werden, dass die vorgestellten Protokolle auch mit FBP-rekonstruierten Fluoroskopiebildern ohne Dosisanstieg durchführbar sein würden [26]. Somit sind die vorgestellten Protokolle auch auf Computertomographen nutzbar, welche über iterative Rekonstruktionsalgorithmen aus technischen oder auch finanziellen Gründen nicht verfügen, was den Anwendungsbereich zusätzlich erweitert.

#### 4.1. Limitationen

Die vorgestellten Publikationen teilen einige Limitationen einschließlich ihres retrospektiven Designs. Das Studienprotokoll für die zervikale PRT führte zu besonders deutlichen Dosis-Unterschieden gegenüber dem entsprechenden Vergleichsprotokoll, welches als einziges auf einem älteren Scanner angewendet wurde. Der wesentliche Anteil entfiel dabei auf die Planungsakquisition mit einer variablen Scanstrecke. Mit einer Angleichung

der Planung an die Protokolle für die lumbale PRT wäre somit trotz des fehlenden iterativen Rekonstruktionsalgorithmus auch auf dem älteren Scanner eine erhebliche Dosisreduktion möglich gewesen. Die Einführung neuer Computertomographen und damit einhergehend auch eine grundlegende Überarbeitung der Untersuchungs- und Interventionsprotokolle stellt jedoch ein für jede Institution gängiges Verfahren dar und spiegelt damit die klinische Realität wider.

In der Studie zur Einführung von Spot Scanning umfasst die Vergleichsgruppe lediglich 22 Patienten, die Studiengruppe weist mit 63 Patienten hingegen eine akzeptable Größe auf. Ursächlich war die sehr erfolgreiche Implementation von Spot Scanning mit der dargelegten Dosisreduktion, sodass auf die standardisierte Volumenakquisition nicht mehr zurückgegriffen wurde.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Beitrag des Scanograms zur Gesamtdosis nicht Gegenstand der durchgeführten Studien war. Ein Dosiswert wird bislang von der Software der Hersteller nicht standardisiert berechnet. Bei zunehmender Dosisreduktion während der Planung und Fluoroskopie sollte der Beitrag des Scanograms jedoch Gegenstand zukünftiger Studien sein.

Die Quantifizierung der Strahlenexposition des Patienten erfolgte in dieser Arbeit im Sinne der bestmöglichen Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Studien vorrangig durch Berechnung des DLP. Aktuell ist die Entwicklung des sogenannten Size-Specific Dose Estimate (SSDE) weit vorangeschritten [27]. Das SSDE schließt zusätzlich den anteroposterioren Diameter als wichtige Einflussgröße auf die absorbierte Dosis des Patienten in die Berechnung ein. Die SSDE berücksichtigt ebenso wie das DLP nicht die Strahlensensibilität einzelner Organe und ist somit keine Messgröße der effektiven Dosis.

## **5 Schlussfolgerung**

Mit den vorgestellten Protokollen kann eine erhebliche Dosisreduktion sowohl gegenüber Vergleichsprotokollen aus der eigenen Institution als auch gegenüber denen der Literatur erreicht werden. Dies gelingt zum einen über den Einsatz von Spot Scanning zu Planungszwecken und zum anderen über eine erhebliche Reduktion des Röhrenstrom-Zeit-Produktes während der Fluoroskopie. Letztere bleibt durch Anwendung der "bottom-up-Strategie" flexibel gegenüber erschwerter Abgrenzbarkeit von Ziel- und Risikostrukturen, welche in der lumbalen Wirbelsäule bei Patienten mit einem BMI gleich oder größer als  $30 \text{ kg/m}^2$  und in den kaudalen Segmenten der zervikalen Wirbelsäule beobachtet werden

kann. Der Einsatz dieser dosisoptimierten Protokolle erlaubt gegenüber den eigenen Vergleichsprotokollen einen gleichwertigen Therapieerfolg hinsichtlich der Schmerzreduktion beim Patienten.

## Literaturverzeichnis

- 1 Manchikanti L, Singh V, Falco FJ, Benyamin RM, Hirsch JA. Epidemiology of low back pain in adults. *Neuromodulation : journal of the International Neuromodulation Society* 2014;17 Suppl 2:3-10.
- 2 Airaksinen O, Brox JI, Cedraschi C, Hildebrandt J, Klaber-Moffett J, Kovacs F, Mannion AF, Reis S, Staal JB, Ursin H, Zanoli G. Chapter 4. European guidelines for the management of chronic nonspecific low back pain. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 2006;15 Suppl 2:S192-300.
- 3 Shemory ST, Pfefferle KJ, Gradisar IM. Modifiable Risk Factors in Patients With Low Back Pain. *Orthopedics* 2016;39:e413-6.
- 4 Choi JW, Lim HW, Lee JY, Lee WI, Lee EK, Chang CH, Yang JY, Sim WS. Effect of Cervical Interlaminar Epidural Steroid Injection: Analysis According to the Neck Pain Patterns and MRI Findings. *The Korean journal of pain* 2016;29:96-102.
- 5 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. *European journal of orthopaedic surgery & traumatology : orthopedie traumatologie* 2015;25 Suppl 1:S177-82.
- 6 Cohen SP, Hayek S, Semenov Y, Pasquina PF, White RL, Veizi E, Huang JH, Kurihara C, Zhao Z, Guthmiller KB, Griffith SR, Verdun AV, Giampetro DM, Vorobeychik Y. Epidural steroid injections, conservative treatment, or combination treatment for cervical radicular pain: a multicenter, randomized, comparative-effectiveness study. *Anesthesiology* 2014;121:1045-55.
- 7 Patrick N, Emanski E, Knaub MA. Acute and Chronic Low Back Pain. *The Medical clinics of North America* 2016;100:169-81.
- 8 Loizides A, Gruber H, Peer S, Galiano K, Bale R, Obernauer J. Ultrasound guided versus CT-controlled paravertebral injections in the lumbar spine: a prospective randomized clinical trial. *AJNR. American journal of neuroradiology* 2013;34:466-70.
- 9 Streitparth F, De Bucourt M, Hartwig T, Leidenberger T, Rump J, Walter T, Maurer M, Renz D, Stelzer L, Wiener E, Hamm B, Teichgraber U. Real-time MR-guided lumbosacral periradicular injection therapy using an open 1.0-T MRI system: an outcome study. *Investigative radiology* 2013;48:471-6.
- 10 Wagner LK, Eifel PJ, Geise RA. Potential biological effects following high X-ray dose interventional procedures. *Journal of vascular and interventional radiology : JVIR* 1994;5:71-84.
- 11 Barnard SG, Ainsbury EA, Quinlan RA, Bouffler SD. Radiation protection of the eye lens in medical workers--basis and impact of the ICRP recommendations. *The British journal of radiology* 2016;89:20151034.
- 12 Seals KF, Lee EW, Cagnon CH, Al-Hakim RA, Kee ST. Radiation-Induced Cataractogenesis: A Critical Literature Review for the Interventional Radiologist. *Cardiovascular and interventional radiology* 2016;39:151-60.

- 13 Gervaise A, Osemont B, Louis M, Lecocq S, Teixeira P, Blum A. Standard dose versus low-dose abdominal and pelvic CT: comparison between filtered back projection versus adaptive iterative dose reduction 3D. *Diagnostic and interventional imaging* 2014;95:47-53.
- 14 Schindera ST, Odedra D, Raza SA, Kim TK, Jang HJ, Szucs-Farkas Z, Rogalla P. Iterative reconstruction algorithm for CT: can radiation dose be decreased while low-contrast detectability is preserved? *Radiology* 2013;269:511-8.
- 15 Shrimpton PC, Jansen JT, Harrison JD. Updated estimates of typical effective doses for common CT examinations in the UK following the 2011 national review. *The British journal of radiology* 2016;89:20150346.
- 16 Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates 1988:79-80.
- 18 Paik NC. Radiation dose reduction in CT fluoroscopy-guided lumbar interlaminar epidural steroid injection by minimizing preliminary planning imaging. *European radiology* 2014;24:2109-17.
- 19 Chang AL, Schoenfeld AH, Brook AL, Miller TS. Radiation dose for 345 CT-guided interlaminar lumbar epidural steroid injections. *AJNR. American journal of neuroradiology* 2013;34:1882-6.
- 20 Amrhein TJ, Schauburger JS, Kranz PG, Hoang JK. Reducing Patient Radiation Exposure From CT Fluoroscopy-Guided Lumbar Spine Pain Injections by Targeting the Planning CT. *AJR. American journal of roentgenology* 2016;206:390-4.
- 21 Artner J, Cakir B, Weckbach S, Reichel H, Lattig F. Radiation dose reduction in CT-guided periradicular injections in lumbar spine: Feasibility of a new institutional protocol for improved patient safety. *Patient safety in surgery* 2012;6:19.
- 22 Andreisek G, Jenni M, Klingler D, Wertli M, Elliott M, Ulbrich EJ, Winklhofer S, Steurer J. Access routes and reported decision criteria for lumbar epidural drug injections: a systematic literature review. *Skeletal radiology* 2013;42:1683-92.
- 23 Kranz PG, Raduazo P, Gray L, Kilani RK, Hoang JK. CT fluoroscopy-guided cervical interlaminar steroid injections: safety, technique, and radiation dose parameters. *AJNR. American journal of neuroradiology* 2012;33:1221-4.
- 24 Paik NC. Radiation Dose Reduction in CT Fluoroscopy-Guided Cervical Transforaminal Epidural Steroid Injection by Modifying Scout and Planning Steps. *Cardiovascular and interventional radiology* 2015;
- 25 Palmer WE. *Spinal Injections for Pain Management*. *Radiology* 2016;281:669-88.
- 26 Elsholtz FHJ, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM. Periradicular infiltration of the lumbar spine: is iterative reconstruction software necessary to establish ultra-low-dose protocols? A quantitative and qualitative approach. *La Radiologia medica* 2018; Epub ahead of print
- 27 Boone JM SK, Cody DD, McCollough CH, McNitt-Gray MF, Toth TL. Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in Pediatric and Adult Body CT Examinations. *AAPM Report No. 204* 2011

## Abkürzungsverzeichnis

AIDR 3D	Adaptive Iterative Dose Reduction 3D
BMI	Body Mass Index
CT	Computertomographie
CTDI	Computed Tomography Dose Index
DLP	Dosis-Längen-Produkt
ESI	Epidural Space Injection
FBP	Filtered Back Projektion (Gefilterte Rückprojektion)
G	Gauge (Längenmaß)
MRT	Magnetresonanztomographie
NRS	Numerische Rating-Skala
PRT	Periradikuläre Infiltrationstherapie
SSDE	Size-Spezifische Dosis-Schätzung
TFESI	Transforaminal Epidural Space Injection

## Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Fabian Henry Jürgen Elsholtz, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

*Evaluation von dosisoptimierten Protokollen für die Computertomographie-gestützte zervikale und lumbale periradikuläre Infiltrationstherapie*

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 beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an den ausgewählten Publikationen entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

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

29.08.2018

---

Unterschrift

## **Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen**

Fabian Henry Jürgen Elsholtz hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

### Publikation 1:

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

*Impact-Factor: 2,011 (2016)*: Datenakquisition, statistische Auswertungen, Erstellung des Manuskripts einschließlich der Abbildungen und Prozess der Veröffentlichung.

### Publikation 2:

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

*Impact-Factor: 1,819 (2017)*: Datenakquisition, statistische Auswertungen, Erstellung des Manuskripts einschließlich der Abbildungen und Prozess der Veröffentlichung.

### Publikation 3:

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo, 2018; doi: 10.1055/a-0632-3930. [Epub ahead of print]

*Impact-Factor: 1,636 (2017)*: Datenakquisition, statistische Auswertungen, Erstellung des Manuskripts einschließlich der Abbildungen und Prozess der Veröffentlichung.

---

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

---

Unterschrift des Doktoranden



## **Druckexemplare der ausgewählten Publikationen**

### **Publikation 1**

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM

Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.

Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370

<https://doi.org/10.1177%2F0284185117694508>



## **Publikation 2**

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>



**Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM

Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.

La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712

<https://doi.org/10.1007/s11547-017-0766-2>

### **Publikation 3**

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>



**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

**Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM

Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.

RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61

<https://doi.org/10.1055/a-0632-3930>

## **Lebenslauf**

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

## Komplette Publikationsliste

### Originalarbeiten

- 1 **Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Köhlitz T, Hamm B, Niehues SM  
Periradicular infiltration of the lumbar spine: testing the robustness of an interventional ultra-low-dose protocol at different body mass index levels.  
Acta Radiologica, 2017; 58(11):1364-1370  
*Impact-Factor: 2,011 (2016)*
- 2 **Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM  
Ultra-low-dose periradicular infiltration of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction by replacing helical planning CT.  
La Radiologia Medica, 2017; 122(9):705-712  
*Impact-Factor: 1,819 (2017)*
- 3 **Elsholtz FHJ**, Kamp JE, Vahldiek JL, Hamm B, Niehues SM  
Periradicular Infiltration of the Cervical Spine: How New CT Scanner Techniques and Protocol Modifications Contribute to the Achievement of Low-Dose Interventions.  
RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 2018; 191(1):54-61  
*Impact-Factor: 1,636 (2017)*
- 4 **Elsholtz FHJ**, Schaafs LA, Erxleben C, Hamm B, Niehues SM  
Periradicular infiltration of the lumbar spine: is iterative reconstruction software necessary to establish ultra-low-dose protocols? A quantitative and qualitative approach.  
La Radiologia Medica, 2018 Jun 19. doi: 10.1007/s11547-018-0913-4. [Epub ahead of print]  
*Impact-Factor: 1,819 (2017)*

## Reviews

- 1 Pustelnik D, **Elsholtz FHJ**, Bojarski C, Hamm B, Niehues SM.  
The CDD System in Computed Tomographic Diagnosis of Diverticular Disease.  
RöFo- Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden  
Verfahren, 2017; Aug;189(8):740-747.  
*Impact-Factor: 1,636 (2017)*

## Kongressbeiträge

- 1 RSNA 2017 in Chicago, USA (Annual Meeting of the Radiological Society of North America)  
Vortrag mit dem Titel *Periradicular infiltration therapy of the lumbar spine: How IR and protocol modifications contribute to achieving ultra-low-dose*
- 2 RSNA 2017 in Chicago, USA (Annual Meeting of the Radiological Society of North America)  
Poster mit dem Titel *Ultra-low-dose periradicular infiltration therapy of the lumbar spine: spot scanning and its potential for further dose reduction*
- 3 ECR 2018 in Wien, Österreich (Europäischer Röntgenkongress):  
Poster mit dem Titel *Periradicular infiltration of the lumbar spine: is iterative reconstruction software necessary for ultra-low-dose protocols? A quantitative and qualitative approach*

## **Danksagung**

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn PD Dr. Stefan M. Niehues für die Bereitstellung des Themas und seine intensive Betreuung während der Erarbeitung, der Veröffentlichung und der Ergebnispräsentation auf internationalen Kongressen.

Prof. Dr. Bernd Hamm gilt mein Dank für die Möglichkeit, in den Strukturen seiner Abteilung wissenschaftlich arbeiten zu können.

Frau Bettina Herwig danke ich für die gründlichen sprachlichen Überarbeitungen und kritischen Anmerkungen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern Michaela und Andreas, meiner Schwester Florentine, meinen drei besten Freunden und Martha Chychla für ihre Ratschläge und immerwährende Unterstützung bedanken.