

Aus dem
Institut für Neuroradiologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. Thomas Liebig

**Evaluation und Optimierung der Röntgendosis bei speziellen diagnostischen und
therapeutischen Verfahren in der Computertomographie und Neuroangiographie**

Habilitationsschrift
zur Erlangung der Venia Legendi
für das Fach Radiologie
der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Dr. med. Robert Forbrig
aus Riesa a. d. Elbe

2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitende Zusammenfassung.....	3
2	Themenrelevante wissenschaftliche Arbeiten.....	8
2.1	Themenblock I: Computertomographie Abdomen und Neurokranium.....	8
2.1.1	Röntgendosis und Bildqualität eines notfallmäßigen High-Pitch CT-Protokolls des Abdomens in portalvenöser Phase bei adipösen Patienten mittels Dual-Source CT der dritten Generation.....	8
2.1.2	Perkutane Drainagenanlage bei Patienten mit superinfizierten renalen und perirenaln Flüssigkeitskollektionen mittels intermittierender CT-Fluoroskopie.....	11
2.1.3	Perkutane Drainage von Flüssigkeitskollektionen nach Leberresektion mittels intermittierender CT-Fluoroskopie.....	14
2.1.4	Röntgendosis und Bildqualität der intraoperativen Computertomographie (iCT) des Neurokraniums im Stereotaxierahmen.....	16
2.2	Themenblock II: Neuroangiographie.....	19
2.2.1	Röntgendosis und Durchleuchtungszeit von modernen endovaskulären Behandlungstechniken bei Patienten mit unrupturierten intrakraniellen Aneurysmen.....	19
2.2.2	Endovaskuläre Behandlung von Basilariskopfaneurysmen mittels intraaneurysmaler Flussteilung.....	22
2.2.3	Röntgendosis und Durchleuchtungszeit bei der endovaskulären Behandlung von lateralen duralen arteriovenösen Fisteln (LDAVF) des Neurokraniums.....	24
2.2.4	Möglicher Einfluss der Dienstzeit auf das klinische Outcome nach mechanischer Rekanalisation von intrakraniellen Großgefäßverschlüssen.....	27
2.2.5	Röntgendosis und Durchleuchtungszeit der diagnostischen Angiographie bei Patienten mit spinaler duraler arteriovenöser Fistel (SDAVF).....	30
3	Abkürzungsverzeichnis.....	34
4	Literaturverzeichnis.....	35

1 Einleitende Zusammenfassung

Das Thema Strahlenschutz genießt bei Röntgenuntersuchungen wie der Computertomographie (CT) und durchleuchtungsgesteuerten Angiographie einen großen Stellenwert. Nicht zuletzt seit der Anfang 2019 aktualisierten Strahlenschutzverordnung [6] ist die Einhaltung von vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) definierten diagnostischen Referenzwerten (engl. diagnostic reference level, DRL) bei röntgengesteuerten diagnostischen und therapeutischen Verfahren hochrelevant. Hierbei entspricht der jeweilige DRL laut Definition der 75% Perzentile der durchschnittlichen Dosisverteilung [42]. Das BfS hat die verschiedenen DRLs für das konventionelle Röntgen sowie für CT- und durchleuchtungsgesteuerte Untersuchungen zuletzt im Jahr 2016 aktualisiert; im Jahr 2018 folgte ein weiteres Update speziell für interventionell-radiologische Eingriffe [7].

Im Rahmen der BfS Aktualisierungen wurden die DRLs in den letzten Jahren wiederholt verringert – dieses Vorgehen ist unmittelbarer Ausdruck des technischen Fortschritts. Moderne Röntgengeräte bieten im Vergleich zu älteren Generationen eine Vielzahl von Dosisreduktionstechniken. Die Bildqualität hat sich gleichermaßen z.T. erheblich verbessert. Die unmittelbaren positiven Folgen dieser technischen Fortschritte sind einerseits eine höhere diagnostische Genauigkeit und andererseits ein reduziertes Risiko hinsichtlich deterministischer und stochastischer Strahlenschäden sowohl für die Patienten als auch das durchführende medizinische Personal. Unabhängig davon werden spezielle durchleuchtungsgesteuerte Interventionen wie z.B. die endovaskuläre Behandlung einer intrakraniellen duralen arteriovenösen Fistel (DAVF) bisher noch nicht im BfS Katalog berücksichtigt [7].

Vor diesem Hintergrund ergaben sich im Rahmen dieser kumulativen Habilitation während meiner Tätigkeit am Institut für Neuroradiologie des LMU Klinikums durch verschiedene Forschungs Kooperationen (u.a. hausintern Klinik und Poliklinik für Radiologie sowie Neurochirurgische Klinik und Poliklinik, extern Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der Uniklinik Köln) konkret folgende wissenschaftliche Hauptfragestellungen:

1. Werden die vom BfS definierten DRLs bei speziellen CT-gesteuerten diagnostischen und therapeutischen Verfahren des Abdomens und Neurokraniums eingehalten? Mit welchen Techniken zur Dosisreduktion kann die Röntgendosis bei diesen Methoden optimiert werden ohne Verlust von Bildqualität?

2. Wie kann die Röntgendosis bei typischen durchleuchtungsgesteuerten Verfahren in der Neuroradiologie (z.B. endovaskuläre Behandlung von intrakraniellen Aneurysmen oder Durafisteln) optimiert werden? Können methodenabhängige DRLs für diese speziellen minimal-invasiven Verfahren definiert werden?

Entsprechend dieser Fragestellungen wurde das vorliegende kumulative Habilitationsprojekt in die zwei Themenblöcke „Computertomographie Abdomen und Neurokranium“ sowie „Neuroangiographie“ gegliedert.

Im **Themenblock I „Computertomographie Abdomen und Neurokranium“** werden vier eigene wissenschaftliche Publikationen illustriert (davon zwei als Erstautor), in denen spezielle diagnostische und interventionelle CT-Verfahren der beiden Körperregionen behandelt werden. Hierbei liegt der Fokus bei den Publikationen als Erstautor auf der Evaluation und Optimierung der Röntgendosis und Bildqualität. Die zwei aufgeführten Arbeiten als Ko-Autor behandeln primär technisch-prozedurale sowie klinische Aspekte und ergänzen die Kernthematik Röntgendosis und Bildqualität.

Ziel von **Teilprojekt 1** war die Evaluation der Röntgendosis und Bildqualität eines dedizierten notfallmäßigen „High-Pitch“ CT-Protokolls des Abdomens an einem Dual-Source CT (DSCT) Scanner der dritten Generation (SOMATOM Force, Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland) in portalvenöser Kontrastmittelfase bei adipösen Patienten mit einem body mass index (BMI) $\geq 30 \text{ kg/m}^2$. In der Literatur lagen bisher nur entsprechende Daten bei unselektierten Patienten mit einem BMI unter 30 kg/m^2 vor, da die Leistungskapazität von älteren CT-Generationen nicht ausreichend war für CT-Untersuchungen von adipösen Patienten mit einem BMI $\geq 30 \text{ kg/m}^2$. Folglich ergab sich bei letztgenannten CT-Untersuchungen regelhaft eine reduzierte Bildqualität bei einer gleichzeitig überproportional hohen Röntgendosis. In unserer Studie fand sich hingegen eine akzeptable Röntgendosis für alle eingeschlossenen Gewichtsklassen (BMI $30\text{--}36.8 \text{ kg/m}^2$ und $> 36.8 \text{ kg/m}^2$) unter Berücksichtigung der vom BfS vorgegebenen DRLs. Die Bildqualität war am höchsten für adipöse Patienten mit einem BMI zwischen 30 und 36.8 kg/m^2 , und bei Patienten mit einem BMI $> 36.8 \text{ kg/m}^2$ zumindest ausreichend. Wir schlussfolgern, dass dieses spezielle „High-Pitch“ CT-Protokoll zukünftig auch bei adipösen Patienten mit einem BMI $> 30 \text{ kg/m}^2$ routinemäßig durchgeführt werden kann aufgrund der hohen Leistungskapazität von modernen DSCT Scannern der dritten Generation.

In den **Teilprojekten 2 und 3** haben wir den technischen und klinischen Erfolg der perkutanen Drainagenanlage von entzündlichen Flüssigkeitsansammlungen des Abdomens mittels intermittierender CT-Fluoroskopie (CTF) evaluiert unter Berücksichtigung der periinterventionell angefallenen Röntgendosis, da bisher publizierte Studien zum Thema CTF-gesteuerte Drainagenanlage lediglich kleine, heterogene Patientenkollektive enthielten. In unseren beiden Studien ergaben sich am konkreten Beispiel der (peri-) renalen (**Teilprojekt 2**) bzw. hepatischen CTF-gesteuerten Drainagenanlage (**Teilprojekt 3**) bei einem jeweils großen homogenen Patientenkollektiv hohe technische und klinische Erfolgs- sowie niedrige Komplikationsraten. Die periprozedural angefallene Röntgendosis war in beiden Studien akzeptabel. Überdies zeigte sich seit den 2000er Jahren ein rückläufiger Trend hinsichtlich der periinterventionell angefallenen Röntgendosis. Diese positive Entwicklung führen wir auf zwischenzeitlich eingeführte CT-Dosisreduktionstechniken und die gestiegene Erfahrung der Interventionalisten zurück.

Ziel von **Teilprojekt 4** war der Vergleich von zwei dedizierten CT-Protokollen (aktivierte versus inaktivierte Dosismodulation) hinsichtlich der Röntgendosis und Bildqualität bei speziellen intraoperativen CT (iCT) Untersuchungen des Neurokraniums mit intravenösem Kontrastmittel im Stereotaxierahmen. Die automatische Dosismodulation besitzt viel Potential zur Dosisreduktion und Erhöhung der Bildqualität, in den letzten Jahren konnte der positive Effekt der Dosismodulation auch für CT-Untersuchungen mit Metallimplantaten nachgewiesen werden. Bei CT-Untersuchungen des Neurokraniums mit metallischen Fremdmaterialien im Untersuchungsgebiet gab es bisher jedoch kaum Erfahrungswerte. In unserer Studie konnten wir nun nachweisen, dass die automatische Dosismodulation noch nicht für spezielle iCT Untersuchungen mit einem für den Neurochirurgen notwendigen Stereotaxierahmen optimiert ist. Im Detail war die Röntgendosis durch die automatische Erhöhung des Röhrenstroms in Höhe des Stereotaxierahmens unter Berücksichtigung der vom BfS definierten DRLs überproportional hoch, wohingegen sich die Bildqualität nicht verbessert hat. Ein eigens definiertes CT-Protokoll mit inaktiverter Dosismodulation ergab hingegen optimalere Dosiswerte bei vergleichbarer Bildqualität.

Im **Themenblock II „Neuroangiographie“** werden fünf eigene wissenschaftliche Publikationen (davon drei als Erst- bzw. Letztautor) vorgestellt, welche detaillierte dosimetrische Informationen einschließlich neuer DRLs zu häufigen diagnostischen und therapeutischen endovaskulären Verfahren in der Neuroradiologie beinhalten.

Ziel von **Teilprojekt 1** war die sinnvolle Erweiterung des DRL-Katalogs hinsichtlich moderner endovaskulärer Behandlungstechniken von unrupturierten intrakraniellen Aneurysmen (UIA) wie bspw. der intra- oder extraaneurysmalen Flussteilung, da bisher lediglich ein DRL für die klassische Coilembolisation definiert wurde; überdies existierten bis dato keine vergleichbaren dosimetrischen Literaturdaten. In unserer Studie hatte weder die Aneurysmalokalisation noch die endovaskuläre Behandlungsart (Coilembolisation, intra-/extraaneurysmaler Flussteiler, gemischte Techniken) einen signifikanten Einfluss auf die Röntgendosis, wohingegen die periprozedurale Durchleuchtungszeit am niedrigsten war bei Implantation eines intraaneurysmalen Flussteilers. Ein dediziertes Niedrigdosis-Protokoll führte zu einer signifikanten Verringerung der Gesamtdosis.

Basierend auf dem vorherigen Thema bezog sich **Teilprojekt 2** gezielt auf die endovaskuläre Behandlung von Basilariskopfaneurysmen. Hierbei haben wir die klassische Coilembolisation mit der modernen intraaneurysmalen Flussteilung verglichen. Im Detail ergaben sich für die beiden Behandlungsformen vergleichbare technische und klinische Erfolgsraten, die dosimetrischen Parameter (Röntgendosis und Durchleuchtungszeit) waren jedoch bei mittels intraaneurysmalem Flussteiler behandelten Patienten signifikant niedriger. Basilariskopfaneurysmen, bei denen prinzipiell beide endovaskulären Verfahren möglich sind, sollten folglich primär mittels intraaneurysmalem Flussteiler behandelt werden.

Im Rahmen von **Teilprojekt 3** haben wir detaillierte dosimetrische Daten zur endovaskulären Behandlung der intrakraniellen lateralen DAVF (LDAVF) publiziert. Auch für diese Entität hat das BfS wie eingangs erwähnt bisher keine geeigneten DRLs veröffentlicht. In unserer Studie waren transarterielle Fistelbehandlungen, insbesondere bei Embolisation mehrerer arterieller Feeder, zeitaufwändiger und mit einer höheren Röntgendosis assoziiert im Vergleich zu einem rein transvenösen Vorgehen. Auch im Rahmen dieser Studie konnten wir nachweisen, dass ein entsprechendes Niedrigdosis-Protokoll verwendet werden sollte zur Optimierung der Röntgendosis.

Teilprojekt 4 beschäftigte sich mit der Frage, ob es messbare prozedurale Unterschiede bei der mechanischen Rekanalisation von intrakraniellen Großgefäßverschlüssen der vorderen Zirkulation im Vergleich Routine- versus Rufdienst geben könnte (sog. „Wochenendeffekt“). Hierbei fand sich für die verschiedenen Subgruppen weder in den Basisdaten (z.B. Schweregrad der klinischen Symptomatik, Zeitfenster, präinterventionelle Bildgebung usw.) noch in den periprozeduralen (z.B. technischer Erfolg der Rekanalisation, Röntgendosis und Durchleuchtungszeit) und Verlaufsparametern (z.B. klinische Symptomatik nach drei

Monaten) ein signifikanter Unterschied. Hingegen war die akut postprozedurale Mortalität bei im Rufdienst behandelten Schlaganfallpatienten signifikant erhöht. Dieser gewisse „Wochenendeffekt“ ließ sich jedoch nicht auf eine geringere periprozedurale Qualität während der mechanischen Rekanalisation im Rufdienst zurückführen.

In **Teilprojekt 5** haben wir schließlich neue DRLs für die häufigste Indikation einer diagnostischen spinalen Angiographie, die spinale DAVF (SDAVF), formuliert. Im Detail war die Röntgendosis für präoperative Angiographien signifikant höher als für postoperative Angiographien. Überdies war die Durchleuchtungszeit bei präoperativen Angiographien von SDAVFs an untypischen Lokalisationen signifikant höher im Vergleich zu solchen an typischen Lokalisationen. Korrespondierend zu unseren interventionellen Dosisstudien des Neurokraniums (Teilprojekte 1 und 3) ergab sich auch für diagnostische spinale Angiographien eine substantielle Dosisreduktion bei Verwendung eines geeigneten Niedrigdosis-Protokolls.

2 Themenrelevante wissenschaftliche Arbeiten

2.1 Themenblock I: Computertomographie Abdomen und Neurokranium

2.1.1 Röntgendosis und Bildqualität eines notfallmäßigen High-Pitch CT-Protokolls des Abdomens in portalvenöser Phase bei adipösen Patienten mittels Dual-Source CT der dritten Generation

Teilprojekt 1: Forbrig R, Ingrisch M, Stahl R, Winter KS, Reiser M, Trumm CG. Radiation dose and image quality of high-pitch emergency abdominal CT in obese patients using third-generation dual-source CT (DSCT). *Sci Rep.* 2019;9:15877.

Journal Impact Factor: 3.998

Hintergrund und Zielsetzung

In der Notaufnahme eines Krankenhauses ist die Mehrschicht-CT häufig die einzige bildgebende Methode, um akute Beschwerden bei übergewichtigen Patienten abzuklären. CT-Scanner der neuesten Generation verfügen über Gantry-Durchmesser bis zu 80 cm, einen Patiententisch mit einer Tragkraft von bis zu 300 kg, eine höhere Leistung der CT-Röhre im Vergleich zu älteren Modellen bei gleichzeitig stabiler Tischgeschwindigkeit sowie einen vergrößerten rekonstruierbaren Bildbereich (field of view, FOV). Diese technischen Erweiterungen sind Ausdruck der Anpassung an ein zunehmend adipöses Patientenspektrum. Mit DSCT Scannern der neuesten, dritten Generation werden sogenannte „High-Pitch“ CT-Untersuchungsprotokolle, d.h. CT-Scans mit schnellem Tischvorschub bis zu einem Wert von 3.2, möglich [1, 36]. Bei einem gleichzeitig maximierten Röhrenstrom bis zu 1300 mA kann mit diesem „High-Pitch“ CT-Protokoll beispielsweise das zusammenhängende Volumen „Abdomen und Becken“ in weniger als einer Sekunde untersucht werden. Die schnelle Bildaquisition bei einem „High-Pitch“ Protokoll bietet zwei elementare Vorteile: Zum einen entstehen weniger Bewegungsartefakte, zum anderen wird die effektive Patientendosis verringert. In der Vergangenheit kam es bei „High-Pitch“ CT-Untersuchungen von stark übergewichtigen Patienten jedoch zu einem erhöhten Bildrauschen, da CT-Röhren eine obere Leistungsgrenze haben und während der sehr kurzen Aquisitionszeit lediglich eine bestimmte Menge an Röntgenstrahlung erzeugt wird. Insofern waren „High-Pitch“ CT-Untersuchungen

bei nicht-gewichtsselektierten Patienten bisher nicht möglich, da die diagnostische Aussagekraft bei adipösen Patienten aufgrund des hohen Bildrauschens reduziert war. Auch in der Literatur gibt es bisher lediglich publizierte Daten zu „High-Pitch“ CT-Protokollen bei Patienten mit einem relativ niedrigen BMI von weniger als 30 kg/m² [3].

Insofern war das Ziel dieser retrospektiven monozentrischen Studie die Evaluation der Röntgendosis und Bildqualität von adipösen Patienten mit einem BMI ≥ 30 kg/m², bei denen eine notfallmäßige „High-Pitch“ CT-Untersuchung des Abdomens in venöser Kontrastmittelphase an einem DSCT Scanner der dritten Generation (SOMATOM Force, Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland) zur Abklärung eines akuten Abdomens durchgeführt wurde. Hierbei wurden die vom BfS definierten DRLs berücksichtigt (Volumetrischer CT-Dosisindex CTDI_{vol} 15 mGy, Dosis-Längen-Produkt DLP 700 mGy*cm).

Methodik und Ergebnisse

Der Untersuchungszeitraum lag zwischen Februar 2015 und Dezember 2016. Das standardmäßige Untersuchungsprotokoll beinhaltete die automatische schwächungsbasierte Röhrenspannungs- (CARE kV, Siemens Healthcare; Referenz Röhrenspannung 140 kV; Dosisoptimierung Stufe 7) [38] und Röhrenstrommodulation (CARE Dose 4D, Siemens Healthcare; Referenz Röhrenstrom Zeit Produkt 80 mAs) [34]. Überdies wurde der iterative Rekonstruktionsalgorithmus „ADMIRE, Stärke 3“ verwendet. Die Untersuchung wurde in helikaler Technik kraniokaudal zwischen Zwerchfell und Symphyse in portalvenöser Kontrastmittelphase angefertigt (Delay 95 Sekunden nach intravenöser Kontrastmittelgabe, Flussrate 2.5 mL/sec., Kontrastmittel Iomeprol 400 mg/mL). Der Pitch-Faktor betrug 1.55 bei einem Tischvorschub von 438 mm/s.

Insgesamt wurden im Untersuchungszeitraum 60 volljährige Patienten eingeschlossen (28 weiblich, 32 männlich, mittleres Alter 56 Jahre) und in Abhängigkeit der im axialen CT-Bild gemessenen mittleren Größe in Höhe der Leber (Summe des anteriorposterioren und links-rechts Durchmessers) dichotomisiert. Der mediane BMI lag in Gruppe A (n=33) bei 31.5 kg/m² und in Gruppe B (n=27) bei 36.8 kg/m² (p<0.001). Die Körpergröße war zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich (p>0.05). Hinsichtlich der Röntgendosis kalkulierten wir in beiden Gruppen eine mediane Röhrenspannung von 100 kV, wobei der minimale Wert bei 80 kV in Gruppe A (n=1) und der maximale Wert bei 130 kV in Gruppe B (n=3) lag (p<0.001). Das mediane Röhrenstrom-Zeitprodukt war in Gruppe A signifikant

niedriger als in Gruppe B (213.6 mAs versus 259.0 mAs; $p < 0.001$). Auch für die Dosiskenngrößen CTDI_{vol}, SSDE (size-specific dose estimates) und DLP wurden für Gruppe A signifikant niedrigere Mittelwerte berechnet (CTDI_{vol} 7.58 versus 12.60 mGy, SSDE 7.99 versus 10.99 mGy, DLP 363.7 versus 630.6 mGy*cm; jeweils $p < 0.001$). Nach Normalisierung der Messergebnisse auf ein Standardvolumen von 40 cm ergaben sich in Gruppe A signifikant niedrigere Mittelwerte für das DLP und die effektive Dosis (ED) im Vergleich zur Gruppe B (DLP 303.8 versus 521.2 mGy*cm, ED 5.16 versus 8.86 mSv ($p < 0.001$)). Überdies berechneten wir für die gesamte Studienpopulation ($n=60$) eine signifikante positive Korrelation zwischen dem BMI und der ED ($r_s=.583$, $p < 0.001$).

Hinsichtlich der objektiven Bildqualität ergab sich ein signifikant höheres mittleres Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (engl. Contrast-to-noise ratio, CNR) in Gruppe A im Vergleich zu Gruppe B für die beiden Oberbauchorgane Leber (5.58 versus 3.93; $p=0.003$) und Milz (6.43 versus 5.44; $p=0.027$). Überdies war der Dosis-unabhängige Bildqualitätsparameter „figure-of-merit CNR“ in Gruppe A für sämtliche im Rahmen der Studie ausgewertete Organsysteme des Abdomens (Leber, Pankreas, Milz, Nieren, Aorta, Pfortader) signifikant höher als in Gruppe B ($p < 0.001$). Der größte Unterschied im figure-of-merit CNR ergab sich für die Leber (Faktor 3.4). Die subjektive Bildqualität wurde von zwei Untersuchern für beide Gruppen unabhängig voneinander auf einer 5-Punkte Skala im Median als „2, gut“ bewertet. Hinsichtlich der Verteilung der Bewertungen ergab sich jedoch ein signifikanter Shift in Richtung Gruppe A (sehr gut 1: $n=13/33$; gut 2: $n=20/33$) im Vergleich zu Gruppe B (sehr gut 1: $n=6/27$; gut 2: $n=16/27$; ausreichend 3: $n=5/27$) ($p=0.035$).

Schlussfolgerung

Basierend auf unseren Daten kann eine „High-Pitch“ CT-Untersuchung des Abdomens in portalvenöser Untersuchungsphase bei adipösen Patienten ($\text{BMI} \geq 30$) routinemäßig durchgeführt werden, da die Röntgenröhren des DSCT der dritten Generation über sehr hohe Leistungskapazitäten verfügen. In unserer Studie stieg die Röntgendosis aufgrund der aktivierten Dosismodulation (CARE Dose 4D und CARE kV) ab einem BMI von mehr als 36.8 kg/m^2 , wobei die vom BfS definierten DRLs eingehalten wurden. Die Bildqualität war bei adipösen Patienten mit einem BMI unter 36.8 kg/m^2 am höchsten und zumindest ausreichend bei Patienten mit einem höheren BMI.

2.1.2 Perkutane Drainagenanlage bei Patienten mit superinfizierten renalen und perirenaln Flüssigkeitskollektionen mittels intermittierender CT-Fluoroskopie

Teilprojekt 2: Trumm CG, Burgard C, Deger C, Stahl R, **Forbrig R**, D'Anastasi M. Intermittent quick-check CT fluoroscopy-guided percutaneous drainage placement in patients with infected renal and perirenal fluid collections: 11-year experience. **Diagn Interv Radiol.** 2021;27:378-85.

Journal Impact Factor: 2.63

Hintergrund und Zielsetzung

Die Harnwegsinfektion (HWI) ist die häufigste bakterielle Infektion des menschlichen Körpers und präsentiert sich in den meisten Fällen als unkomplizierte Zystitis oder Pyelonephritis. Bei unkomplizierten HWIs, welche gehäuft bei jungen Frauen auftreten und gut mit geeigneten Antibiotika behandelbar sind, wird keine weiterführende Bildgebung notwendig. Komplizierte HWIs zeichnen sich hingegen häufig durch aufsteigende Infektionen bis zu den Nieren mit atypischen Organismen etwa bei Diabetes-Patienten aus, bei denen es bspw. zu kolikartigen Schmerzen und persistierendem Fieber trotz Antibiotikatherapie kommen kann. Bei klinischem und/oder laborchemischem Verdacht auf einen (peri-) renalen Abszess ist zunächst eine Ultraschalluntersuchung indiziert. Bei unübersichtlichen Verhältnissen und/oder zur genaueren Einordnung der Abszessausdehnung (z.B. in den perirenaln Raum) wird im nächsten Schritt eine Kontrastmittel-verstärkte CT-Untersuchung notwendig [24].

Während kleinere renale Abszesse mit einem Durchmesser von weniger als 3 cm meist konservativ mittels Antibiose kurativ behandelbar sind, wird insbesondere bei größeren renalen Abszessen oder superinfizierten retroperitonealen Flüssigkeitsansammlungen (z.B. nach Nieren-OP) aufgrund der tiefen Lokalisation zusätzlich eine perkutane Aspiration und/oder Drainagenanlage mittels intermittierender CTF notwendig [28]. Die CTF ermöglicht in Echtzeit eine zielgenaue Lokalisation und Aspiration bzw. Drainage des entzündlichen Verhalts unter Schonung des benachbarten gesunden Gewebes [9].

Das Ziel dieser retrospektiven monozentrischen Studie war die Evaluation des technischen und klinischen Erfolgs der perkutanen Drainagenanlage bei symptomatischen renalen und perirenaln Flüssigkeitskollektionen (einschließlich Abszessen und superinfizierten

Nierenzysten) mittels intermittierender CTF in einem großen Patientenkollektiv. Überdies wurde die durchschnittliche Röntgendosis dieser speziellen CT-gesteuerten Intervention ermittelt.

Methoden und Ergebnisse

Zwischen August 2005 und November 2016 wurden insgesamt 48 Patienten eingeschlossen. Alle Interventionen wurden an einem 16- (Somatom Sensation 16, Siemens) oder 128-Zeilen (Somatom Definition AS+; Somatom Definition Edge, Siemens) CT mit Fluoroskopie-Option (CARE Vision CT, Siemens) durchgeführt. Basierend auf einem maximal 48 Stunden alten diagnostischen Kontrastmittel-verstärkten CT des Abdomens wurde die Indikation zur CTF-gesteuerten Drainagenanlage bei symptomatischem (peri-) renalem Verhalt gestellt. Hinsichtlich des interventionellen Workflows wurde in jedem Fall ein prä- und postinterventionelles natives CT des Abdomens angefertigt. Zur Planung des optimalen Stichkanals für die perkutane Drainagenanlage wurde das präinterventionelle CT dreidimensional rekonstruiert und mit dem vorher angefertigten diagnostischen Kontrastmittel-verstärkten CT korreliert. Bei Bedarf wurden CT-Scans in früharterieller Kontrastmittelpphase und/oder in der Ablaufphase ergänzt zur optimierten Visualisierung bspw. von zu punktierenden Flüssigkeitskollektionen mit enger Lagebeziehung zu Arterien und den ableitenden Harnwegen. Die Intervention selbst erfolgte unter Verwendung eines dedizierten Niedrigdosis-Protokolls mit einem Röhrenstrom-Zeit-Produkt von 10 mAs [8].

Zur Optimierung des Strahlenschutzes für den durchführenden Interventionalisten wurde während der CTF neben den üblichen Maßnahmen (Röntgenschürze, Schilddrüsen- und Linsenschutz) ein zusätzlicher Röntgenschutz am Patienten angebracht zur Reduktion der Streustrahlung. Überdies war die Winkel-abhängige Röntgenstrahlmodulation (Hand Care®) aktiviert. Mithilfe dieses Tools werden die Hände des Interventionalisten einer niedrigeren Röntgenstrahlung ausgesetzt, da die Röntgenröhre in der Position zwischen 11 und 3 Uhr automatisch ausgeschaltet wird.

Die CTF-gesteuerte perkutane Drainagenanlage wurde bei insgesamt 44 Patienten in 61 Sitzungen durchgeführt. Im Detail konnten 73 Single-Lumen Pigtaildrainagen erfolgreich in 71 Flüssigkeitskollektionen eingebracht werden. In vier Fällen gelang die Drainagenanlage bzw. Aspiration von Flüssigkeit nicht, entsprechend lag die technische Erfolgsrate bei 94.5% (n= 69/73). Bei fünf Patienten wurden zusätzliche invasive Maßnahmen nach CTF-gesteuerter perkutaner Drainagenanlage notwendig: Nephrektomie (n=3), partielle

Nephrektomie (n=1) und chirurgische Spülung (n=1). Der klinische Erfolg der minimal-invasiven Drainagenanlage lag somit bei 88.6% (n=39/44 Patienten).

Das mittlere Gesamt-DLP betrug 749 ± 385 mGy*cm. Im Detail lag das mittlere DLP bei 413 ± 245 mGy*cm für das präinterventionelle CT und bei 250 ± 185 mGy*cm für das postinterventionelle CT. Das mediane periinterventionelle DLP für die CTF-gesteuerte perkutane Drainagenanlage betrug 45 mGy*cm (23.5–83 mGy*cm).

Schlussfolgerung

Unsere Daten zeigen, dass die intermittierende CTF-gesteuerte perkutane Drainagenanlage bei (peri-) renalen symptomatischen Flüssigkeitsansammlungen in Kombination mit einer gezielten systemischen Antibiotikatherapie hohe technische und klinische Erfolgsraten erreichen kann bei einer gleichermaßen akzeptablen Röntgendosis. Die Hauptvorteile dieser Technik sind der minimal-invasive Zugang, die Möglichkeit der sofortigen Probenentnahme und –analyse auf Mikroorganismen zur zügigen Initiierung einer gezielten Antibiotikatherapie sowie eine niedrige Komplikationsrate. Folglich kann ein offen-chirurgischer Eingriff bei diesem häufig schwer kranken Patientenkollektiv in vielen Fällen vermieden werden.

2.1.3 Perkutane Drainage von Flüssigkeitskollektionen nach Leberresektion mittels intermittierender CT-Fluoroskopie

Teilprojekt 3: Winter KS, Greif V, Crispin A, Burgard C, **Forbrig R**, Liebig T, Trumm CG, Stahl R. CT-Guided Drainage of Fluid Collections Following Liver Resection: Technical and Clinical Outcome of 143 Patients during a 14-Year Period. **Diagnostics (Basel)**. 2021;11:826.

Journal Impact Factor: 3.706

Hintergrund und Zielsetzung

Nach operativer Leberresektion kommt es häufig zu intraabdominalen Flüssigkeitskollektionen wie bspw. Seromen, Lymphozelen, Hämatomen oder Biliomen. Im Falle einer Superinfektion bzw. Abszessbildung steigt die Morbidität und Mortalität rapide an. Die CT ist ein geeignetes Bildgebungsverfahren zur Diagnose und Therapieplanung dieser Flüssigkeitskollektionen [37].

Neben der Antibiotikatherapie stellt die perkutane Drainagenanlage mittels intermittierender CTF eine geeignete Therapieform von hepatischen Flüssigkeitskollektionen dar, welche der offenen chirurgischen Drainage bzw. Abszessspülung aufgrund des minimal-invasiven Konzepts vorgezogen werden sollte [37, 43].

Da die meisten Studien zum Thema perkutane Drainage heterogene und eher kleine Patientenkollektive beinhalten, war das Ziel dieser retrospektiven monozentrischen Studie die Evaluation des technischen und klinischen Erfolgs am konkreten Beispiel der perkutanen Drainagenanlage von Flüssigkeitskollektionen nach Leberresektion mittels intermittierender CTF in einem großen homogenen Patientenkollektiv. Zudem wurde die Entwicklung der periinterventionell angefallenen Röntgendosis im zeitlichen Verlauf analysiert.

Methoden und Ergebnisse

Insgesamt wurden 143 Patienten (87 männlich, mittleres Alter 59 Jahre) zwischen 2004 und 2017 eingeschlossen. Alle Interventionen wurden an einem 64- (Somatom 64, Siemens) oder 128-Zeilen (Somatom Definition AS+; Somatom Definition Edge, Siemens) CT durchgeführt. In jedem Fall wurden zusätzlich zur CTF-gesteuerten perkutanen Drainage ein präinterventionelles Planungs-CT und ein postinterventionelles Kontroll-CT, jeweils ohne intravenöses Kontrastmittel, angefertigt. Hinsichtlich der Röntgendosis wurde das DLP

jeweils für das prä- und postinterventionelle CT sowie für die CTF-gesteuerte Drainagenanlage gemessen. Die Entwicklung der Röntgendosis im Untersuchungszeitraum wurde mithilfe einer zeitlichen Dichotomisierung analysiert (2004-2010 versus 2011-2017).

Von insgesamt 189 CT-Interventionen gelang in 188 Fällen die perkutane CTF-gesteuerte Drainagenanlage und ausreichende Drainage der Flüssigkeitskollektion (<10% vom Ausgangsbefund). Dies entspricht einer technischen Erfolgsrate von 99.5%. Bei 7/143 Patienten (4.1%) trat eine periinterventionelle Komplikation auf mit der Notwendigkeit einer Revisions-OP in zwei Fällen. Hinsichtlich der klinischen Erfolgsrate zeigte sich ein Rückgang des C-reaktiven Proteins in 74%, der Leukozytenzahl in 87% und des Serum-Bilirubins in 62% der Fälle.

Das mediane DLP der gesamten CTF-gesteuerten Intervention einschließlich prä- und postinterventionellem CT war im zweiten Zeitraum zwischen 2011 und 2017 signifikant niedriger als im ersten Zeitraum zwischen 2004 und 2010 (536 versus 745.5 mGy*cm, $p<0.05$). Die größte prozentuale DLP-Reduktion ergab sich periinterventionell im Rahmen der intermittierenden CTF (28 versus 86 mGy*cm, -67.3%).

Schlussfolgerung

In unserer Studie führte die perkutane CTF-gesteuerte Drainage von symptomatischen Flüssigkeitskollektionen nach Leberresektion zu einer sehr hohen technischen und guten klinischen Erfolgsrate. Im Vergleich zur offenen chirurgischen Abszessspülung weist die perkutane CTF-gesteuerte Drainage relativ niedrige Komplikationsraten auf und kann wiederholt durchgeführt werden. Im Laufe der Jahre beobachteten wir einen signifikanten Rückgang der Röntgendosis bei dieser Prozedur. Wir führen diese positive Entwicklung einerseits auf technische Fortschritte der CT-Geräte mit optimierten Techniken zur Dosisreduktion und andererseits auf eine gestiegene Erfahrung der durchführenden Interventionalisten zurück.

2.1.4 Röntgendosis und Bildqualität der intraoperativen Computertomographie (iCT) des Neurokraniums im Stereotaxierahmen

Teilprojekt 4: Forbrig R, Geyer LL, Stahl R, Thorsteinsdottir J, Schichor C, Kreth FW, Patzig M, Herzberg M, Liebig T, Dorn F, Trumm CG. Radiation dose and image quality in intraoperative CT (iCT) angiography of the brain with stereotactic head frames. **Eur Radiol.** 2019;29:2859–67.

Journal Impact Factor: 4.101

Hintergrund und Zielsetzung

Seit den 1980er Jahren ist die intraoperative Computertomographie (iCT) ein essentieller Baustein in der navigierten Neurochirurgie [35]. In der Schnittbildgebung des Gehirns ist das iCT als schnelles, sicheres und robustes Verfahren etabliert sowohl bei stereotaktischen Probeentnahmen von intrakraniellen Läsionen zur histologischen Diagnosesicherung [13] als auch in der intraoperativen Live-Bildgebung während neurochirurgischer Operationen wie bspw. der Resektion von Orbita-assoziierten Tumoren [40].

Bei der stereotaktischen intrakraniellen Probenentnahme handelt es sich um ein kombiniertes Verfahren aus stereotaktischer Lokalisation der Zielläsion und bildgestützter Operation. Hierfür wird der Kopf des Patienten in Vollnarkose in einem speziellen Stereotaxierahmen fixiert [22]. Im nächsten Schritt wird ein iCT des Neurokraniums in arterieller Kontrastmittelpase angefertigt, die CT-Bilder werden dann in eine dedizierte Workstation übertragen und mit Magnetresonanztomographie (MRT)- und/oder O- (2-18F Fluoroethyl) - L-Tyrosin Positronenemissionstomographie (FET-PET) Daten fusioniert. Basierend auf den multimodalen Bildinformationen wird ein geeigneter Zielpunkt innerhalb der Läsion definiert und schließlich (ausgehend vom Stereotaxierahmen) der optimale Zugangsweg unter Berücksichtigung von funktionell relevanten Hirnstrukturen und Gefäßen gewählt.

CT-Scanner müssen in diesem Zusammenhang eine maximale diagnostische Genauigkeit bieten bei einer gleichzeitig tolerablen Röntgendosis basierend auf dem ALARA (as low as reasonably achievable) Prinzip. Aus diesem Grund beinhalten moderne CT-Geräte wie eingangs erwähnt verschiedene Techniken wie bspw. die automatische Modulation sowohl der Röhrenspannung als auch des Röhrenstroms und iterative Rekonstruktionstechniken [20]. Mittels automatischer Dosismodulation kann das Bildrauschen des untersuchten Objektes,

welches bspw. von der Patientengröße und von Fremdmaterialien beeinflusst wird, verringert werden, indem die Röhrenleistung automatisch angepasst wird [10].

In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass die automatische Dosismodulation und iterative Rekonstruktion einen positiven Einfluss sowohl auf die Röntgendosis als auch die Bildqualität haben bei nativen CT-Untersuchungen des Neurokraniums ohne Fremdmaterialien [44]. Bei CT-Untersuchungen des Kopfes und Halses mit Metallimplantaten gibt es bisher jedoch nur wenig Erfahrungswerte [5]. Überdies wurde die Effektivität der oben genannten CT-Techniken bei Kontrastmittel-verstärkten iCT Untersuchungen des Neurokraniums mit extrakorporalen metallischen Fremdmaterialien noch nicht systematisch untersucht.

Aus diesen Gründen war das Ziel dieser retrospektiven monozentrischen Studie, zwei CT-Untersuchungsprotokolle (aktivierte versus inaktivierte Dosismodulation in Kombination mit iterativer Rekonstruktion) bei iCTs des Neurokraniums in arterieller Kontrastmittelfase im Stereotaxierahmen an einem 128-Zeilen CT-Scanner (Somatom Definition AS+, Siemens) hinsichtlich der Röntgendosis und Bildqualität zu vergleichen. Hierbei wurden die vom BfS definierten DRLs (CTDI_{vol} 60 mGy, DLP 850 mGy*cm) in der Auswertung berücksichtigt.

Methodik und Ergebnisse

Insgesamt wurden 200 Patienten zwischen Februar 2016 und Dezember 2017 untersucht (jeweils $n=100$; Gruppe A: Röhrenstrommodulation aktiviert ‚Siemens Care Dose 4D‘; Gruppe B: Röhrenstrommodulation inaktiv, fixer Röhrenstromwert 300 mAs). Einschlusskriterien waren Alter ≥ 18 Jahre, Verwendung des gleichen Stereotaxierahmens (Material Aluminium), identische Position des Stereotaxierahmens in Höhe der Schädelbasis und subkutane Fixierung mittels 4 Edelstahl-Pins, und fixe Röhrenspannung (120 kV).

Hinsichtlich der Röntgendosis kalkulierten wir einen medianen Röhrenstrom von 643 mAs in Gruppe A mit aktivierter Röhrenstrommodulation versus 300 mAs (fixer Wert) in Gruppe B ($p<0.001$). Der mediane Röhrenstrom in Gruppe A betrug 1207 mAs in Höhe des Stereotaxierahmens und 332 mAs außerhalb der Rahmen-Höhe ($p<0.001$). Auch die medianen Werte für CTDI_{vol} , DLP und ED waren in Gruppe A signifikant höher im Vergleich zur Gruppe B (CTDI_{vol} 91.54 versus 43.15 mGy; DLP 1561 versus 769 mGy*cm; ED 2.97 versus 1.46 mSv; jeweils $p<0.001$). Die Dosisreduktion in Gruppe B betrug 51%.

Weder die objektive noch die subjektive Bildqualität unterschieden sich signifikant zwischen beiden Gruppen. Im Detail ergab sich ein medianes Signal-Rausch-Verhältnis von 6.2 in Gruppe A versus 6.1 in Gruppe B für die graue Substanz, und von 4.8 in Gruppe A versus 4.9 in Gruppe B für die weiße Substanz (jeweils $p > 0.05$). Die Grau-Weiß-Differenzierung war in Höhe des Stereotaxierahmens in beiden Gruppen nicht erkennbar (mediane Bewertung jeweils „0“), wohingegen die Arterien sowohl in Gruppe A als auch in Gruppe B ausreichend beurteilbar waren (mediane Bewertung jeweils „1“). Außerhalb des Stereotaxierahmens war die Visualisierung sowohl der kortikalen Strukturen als auch der Arterien in beiden Gruppen gut (mediane Bewertung jeweils „2“).

Schlussfolgerung

Bei aktivierter Dosismodulation ergab sich eine disproportional hohe Röntgendosis, welche durch eine über die automatische Röhrenstrommodulation getriggerte substantielle Erhöhung des Röhrenstroms in Höhe des Stereotaxierahmens verursacht wurde. Die Bildqualität wurde durch die Erhöhung der Röhrenleistung jedoch nicht verbessert. Wir schlussfolgern, dass die automatische Röhrenstrommodulation noch nicht für CT-Untersuchungen des Neurokraniums mit extrakorporalen metallischen Fremdmaterialien optimiert ist. Weitere dosimetrische Untersuchungen mit Erfassung von detaillierten Daten zur tatsächlichen Patientendosis sind notwendig. Bis dahin sollte aus unserer Sicht die automatische Dosismodulation bei diesen speziellen CT-Untersuchungen deaktiviert werden. In unserer Studie ergaben sich unter Verwendung fixer Röhrenparameter (mAs 300, kV 120) optimalere Dosiswerte bei vergleichbarer Bildqualität in Hirnregionen außerhalb des Stereotaxierahmens, welche für den stereotaktischen Neurochirurgen von primärem Interesse sind. Die Röntgendosis dieses optimierten iCT Protokolls lag hierbei unterhalb der vom BfS definierten DRLs.

2.2 Themenblock II: Neuroangiographie

2.2.1 Röntgendosis und Durchleuchtungszeit von modernen endovaskulären Behandlungstechniken bei Patienten mit unrupturierten intrakraniellen Aneurysmen

Teilprojekt 1: Forbrig R, Ozpeynirci Y, Grasser M, Dorn F, Liebig T, Trumm CG. Radiation dose and fluoroscopy time of modern endovascular treatment techniques in patients with saccular unruptured intracranial aneurysms. **Eur Radiol.** 2020;30:4504-13.

Journal Impact Factor: 5.315

Hintergrund und Zielsetzung

Hinsichtlich der durchleuchtungsgesteuerten intrakraniellen Aneurysmabehandlung hat das BfS für den Dosisparameter Dosis-Flächen-Produkt (DFP) einen DRL von $250 \text{ Gy} \cdot \text{cm}^2$ festgelegt. Dieser Wert bezieht sich laut der aktuellen Version des BfS explizit auf die Coilembolisation [7]. Alternative neuartige endovaskuläre Techniken wie bspw. die Implantation eines intraaneurysmalen Flussteilers (z.B. WEB-Device) [33] oder extraaneurysmalen Flussteiler-Stents (Flow-Diverter, FD) [21] werden bisher nicht berücksichtigt. Die intra- und extraaneurysmalen Flussteiler werden heutzutage häufig bei breitbasigen Aneurysmen und/oder Bifurkationsaneurysmen eingesetzt.

In den letzten Jahren wurden überwiegend Dosisstudien zum Aneurysma-Coiling publiziert [4]. Überdies wurden in diesen Studien primär unselektierte Patienten untersucht, d.h. es wurden sowohl elektive als auch notfallmäßige Aneurysmabehandlungen (akut rupturiertes oder symptomatisches Aneurysma) eingeschlossen.

Basierend auf den genannten Aspekten war das Ziel dieser retrospektiven monozentrischen Studie die Evaluation der Röntgendosis und Durchleuchtungszeit bei Patienten mit sakkulärem unrupturiertem intrakraniell Aneurysma (UIA), welche mittels der folgenden endovaskulären Techniken elektiv behandelt wurden: Coiling, FD, Web-Device, kombinierte Techniken. Mit unseren Daten möchten wir die DRLs gezielt für die genannten Katheter-gestützten Verfahren erweitern, um zukünftig geeignete dosimetrische Landmarken für die behandelnden Neurointerventionalisten vorzugeben.

Methodik und Ergebnisse

Zwischen Januar 2015 und Mai 2019 wurden insgesamt 87 Patienten (59 weiblich, mittleres Alter 54 Jahre) mit einem inzidentellen sakkulären UIA an den häufigsten drei Lokalisationen [Ramus communicans anterior (engl. anterior communicating artery ACOM), intradurales Segment der Arteria carotis interna (ACI), Basilariskopf] eingeschlossen, welche endovaskulär behandelt wurden. Bei der Angiographieanlage handelte es sich um ein biplanares Gerät (Axiom Artis dBS, Siemens Healthineers, Forchheim, Deutschland).

Hinsichtlich des standardmäßigen endovaskulären Procedere wurde bei jedem Patienten über einen transfemorale Zugang zunächst die jeweilige supraaortale Arterie durchleuchtungsgesteuert sondiert. Die DSA (digitale Subtraktionsangiographie) Übersichtsserien am Anfang und Ende der Intervention wurden mit einem FOV von 32 cm im anteriorposterioren und lateralen Strahlengang sowie einer Bildfrequenz von 1-4 Bildern pro Sekunde, die periprozeduralen Arbeitsprojektionen mit einem fokussierten FOV von 11-16 cm angefertigt. Die Durchleuchtung wurde mit einer Pulsfrequenz von 7.5 Bildern pro Sekunde durchgeführt. Für die DSA Serien standen zwei voreingestellte Protokolle zur Verfügung: Niedrigdosis (Röhrenspannung 73 kV, Pulsweite 50 ms, Dosis 1820 $\mu\text{Gy}/\text{Puls}$) und Normaldosis (Röhrenspannung 73 kV, Pulsweite 100 ms, Dosis 3000 $\mu\text{Gy}/\text{Puls}$).

Die mediane Aneurysmagröße betrug 6.7 mm. 30/87 Patienten (34.5%) befanden sich am ACOM, 40/87 (46%) an der intrakraniellen ACI und 17/87 (19.5%) am Basilariskopf. Hinsichtlich der Behandlungstechnik wurden 26/87 Patienten (29.9%) mittels Coilembolisation behandelt, 24/87 (27.6%) mittels FD, 21/87 (24.1%) mittels WEB und 16/87 (18.4%) mittels einer kombinierten Technik.

Insgesamt ergab sich für das Patientenkollektiv ein medianes DFP von 116 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ (25%; 75% Perzentile = DRL: 78; 165 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$). Im Detail war das mediane DFP am niedrigsten für die Coilembolisation [94 (73; 130) $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$] im Vergleich zu 134 (80; 176) $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ für FD, 118 (90; 176) $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ für die WEB-Implantation und 131 (98; 209) $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ für kombinierte Techniken ($p>0.05$). Letztgenannte verursachten eine signifikant höhere mediane Durchleuchtungszeit im Vergleich zu den einzelnen anderen endovaskulären Verfahren (kombiniert 94 Minuten, Coiling 49 Minuten, FD 34 Minuten, WEB 26 Minuten; jeweils $p<0.003$). Die Aneurysmalokalisation hatte weder auf das mediane DFP noch die mediane Durchleuchtungszeit einen signifikanten Einfluss (jeweils $p>0.05$).

Hinsichtlich des DSA-Protokolls wurde bei 25/87 Patienten (28.7%) ein Niedrigdosis- und bei 37/87 (42.5%) ein Normaldosis-Protokoll verwendet. Bei den restlichen 25/87 Patienten (28.7%) wurden beide Protokolle verwendet. Bzgl. der Röntgendosis ergab sich hierbei ein signifikant niedrigeres mittleres DFP für die Niedrigdosis-Gruppe im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen (102 versus jeweils 144 Gy*cm²; p <0.018 bzw. <0.022). Basierend auf dem mittleren Dosisindex (DFP pro DSA-Serie) berechneten wir eine Dosisreduktion von 43% bei Verwendung eines Niedrigdosis-Protokolls (4.49 versus 7.89 bzw. 6.78 Gy*cm²; jeweils p<0.001). Dieses Protokoll wurde am häufigsten bei der Coilembolisation verwendet (10/25 Patienten, 40%), wohingegen ein Normaldosis-Protokoll meist bei FD und WEB Fällen gewählt wurde [15/37 (40.5%) bzw. 10/37 (27%) Patienten].

Schlussfolgerung

Unsere Studienergebnisse geben einen detaillierten Überblick zur Röntgendosis bei modernen endovaskulären Behandlungstechniken von UIAs. Diese Daten erscheinen aus unserer Sicht geeignet für eine sinnvolle Erweiterung der DRLs im Feld der durchleuchtungsgesteuerten Aneurysmabehandlung des Neurokraniums. Hinsichtlich der Dosisoptimierung ist die Verwendung eines dedizierten Niedrigdosis-Protokolls aus unserer Erfahrung gut geeignet für Neurointerventionen mit stark röntgendichten Fremdmaterialien wie bspw. Platincoils. Im Gegensatz dazu sollte zur besseren Visualisierung von weniger röntgendichten Materialien wie bspw. intra- und extraaneurysmalen Flussteilern ein Normaldosis-Protokoll verwendet werden.

2.2.2 Endovaskuläre Behandlung von Basilariskopfaneurysmen mittels intraaneurysmaler Flussteilung

Teilprojekt 2: Ozpeynirci Y, Hutschenreuter B, Forbrig R, Brückmann H, Liebig T, Dorn F. Endovascular treatment of basilar tip aneurysms in the era of endosaccular flow disruption: a comparative study. **Neuroradiology**. 2021;63:619–26.

Journal Impact Factor: 2.804

Hintergrund und Zielsetzung

Im Rahmen dieser monozentrischen retrospektiven Studie wurden alle Patienten zwischen 2013 und 2019 eingeschlossen, bei denen eine endovaskuläre Behandlung eines Basilariskopfaneurysmas durchgeführt wurde. Im Detail wurden zwei unterschiedliche Behandlungstechniken (Coilembolisation versus Implantation eines intraaneurysmalen Flussteilers) hinsichtlich des technischen und klinischen Erfolges sowie gängiger Dosisparameter (DFP, Air kerma Produkt, Durchleuchtungszeit) verglichen.

Methodik und Ergebnisse

Von 41 eingeschlossenen Patienten (14 männlich, mittleres Alter 60 Jahre) wurden 23 (56%) mittels intraaneurysmalem Flussteiler und 18 (44%) mittels Coilembolisation (mit oder ohne zusätzliche Stentimplantation) behandelt. Die mittlere Aneurysmagröße war zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich (8 versus 6.9 mm, $p=0.2$). In Bezug auf die Dosisparameter ergaben sich signifikant niedrigere Durchschnittswerte für die mittels intraaneurysmalem Flussteiler behandelten Patienten (DFP 76 versus 152 Gy*cm², Air kerma Produkt 1.7 versus 3.8 Gy, Durchleuchtungszeit 33 versus 81 Minuten; jeweils $p<0.001$). Die periprozedurale Komplikationsrate war in der Coiling-Gruppe signifikant höher ($p=0.007$), das klinische Outcome in beiden Gruppen jedoch nicht signifikant unterschiedlich ($p=0.07$). Patienten in der Coiling-Gruppe erhielten signifikant häufiger eine langfristige medikamentöse Plättchenhemmung (61 versus 26%, $p=0.002$).

Schlussfolgerung

Hinsichtlich der endovaskulären Versorgung eines Basilariskopfaneurysmas ergaben sich für die unterschiedlichen Techniken vergleichbare technische und klinische Erfolgsraten. Bei der Behandlung mittels intraaneurysmalem Flussteiler fanden sich jedoch substantiell niedrigere

Dosiswerte, überdies wurde mit dieser Technik seltener eine langfristige Plättchenhemmung nötig. Folglich sollten Basilariskopfaneurysmen, bei denen beide Methoden technisch machbar sind, basierend auf unseren Daten bevorzugt mittels intraaneurysmale Flussteiler behandelt werden.

2.2.3 Röntgendosis und Durchleuchtungszeit bei der endovaskulären Behandlung von lateralen duralen arteriovenösen Fisteln (LDAVF) des Neurokraniums

Teilprojekt 3: Forbrig R, Stahl R, Geyer LL, Ozpeynirci Y, Liebig T, Trumm CG. Radiation Dose and Fluoroscopy Time of Endovascular Treatment in Patients with Intracranial Lateral Dural Arteriovenous Fistulae. **Clin Neuroradiol.** 2021;31:1149–57.

Journal Impact Factor: 3.649

Hintergrund und Zielsetzung

Die intrakranielle DAVF ist ein krankhafter Kurzschluss zwischen zuführenden meningealen Arterien (sogenannte „Fistel-Feeder“) – meistens aus der Arteria carotis externa – und intrakraniellen venösen Blutleitern (=Sinus) und/oder Venen. Diese DAVFs bzw. Durafisteln bilden einen Anteil von ungefähr 10-15% aller intrakraniellen arteriovenösen Malformationen. Die häufigste Untergruppe ist die LDAVF, welche sich klassischerweise als „fuchsbauartige“ Fistelfläche im Übergangsbereich des Sinus transversus zum Sinus sigmoideus darstellt. LDAVFs entstehen bspw. nach einer Thrombose der genannten Sinusabschnitte oder nach einem Schädelhirntrauma mit Fraktur des benachbarten Felsenbeins. Das klinische Leitsymptom ist der pulsatile Tinnitus. Eine gebräuchliche Einteilung der LDAVFs nach Cognard beinhaltet die Grade I-V [11]. Hierbei geht von den niedriggradigen Fisteltypen (Cognard I und IIa) kein Blutungsrisiko aus, da der Blutabstrom lediglich im Sinussystem stattfindet (Grad I antegrad; Grad IIa retrograd). Ab Cognard Grad IIb kommt es jedoch zu einem direkten Rückstau des kurzgeschlossenen Blutes in intrakranielle Venen mit (Grad IIb) oder ohne Sinusbeteiligung (Grad III-V). Hierbei steigt das Risiko einer Hirnblutung graduell bis auf zweistellige Prozentwerte pro Jahr an. Trotz des fehlenden Blutungsrisikos werden auch niedriggradige Durafisteln häufig behandelt, da die Lebensqualität durch den Tinnitus stark beeinträchtigt werden kann.

Goldstandard in der Behandlung von LDAVFs ist die durchleuchtungsgesteuerte endovaskuläre Embolisation [14]. Grundsätzlich können LDAVFs transarteriell bspw. mit Flüssigembolisat und/oder transvenös mittels Coilembolisation behandelt werden. Aufgrund der heterogenen Natur von LDAVFs hängt die Wahl der geeigneten Behandlung von der individuellen Fistelanatomie ab. Hierbei spielen etwa die Größe und Morphologie der

arteriellen Fistel-Feeder, welche einer superselektiven Katheterisierung zugänglich sein müssen, und der venöse Drainagetyp eine entscheidende Rolle.

Wie eingangs erwähnt, findet die endovaskuläre Embolisation einer intrakraniellen Durafistel im BfS Katalog bisher keine Erwähnung [7]. Zudem existieren in der Literatur kaum Daten zur anfallenden Röntgendosis bei der endovaskulären Behandlung von DAVFs [2]. Nicht zuletzt fehlen in diesen Studien detaillierte dosimetrische Subgruppenanalysen (speziell LDAVF), zum Cognard Grad sowie zur jeweiligen endovaskulären Behandlungstechnik.

Ziel dieser retrospektiven monozentrischen Studie war somit die Evaluation der Röntgendosis und Durchleuchtungszeit bei Patienten mit intrakranieller LDAVF, welche endovaskulär behandelt wurden. Hierbei wurden sowohl die Cognard Klassifikation als auch die dedizierte kathetergestützte Behandlungstechnik (transarterielle und/oder transvenöse Fistelembolisation), der technische Erfolg und das jeweils verwendete DSA-Dosisprotokoll berücksichtigt.

Methodik und Ergebnisse

Zwischen Januar 2014 und Dezember 2019 wurden insgesamt 70 volljährige Patienten (19 weiblich, medianes Alter 65 Jahre) eingeschlossen, welche eine endovaskuläre LDAVF Behandlung an einer biplanaren Angiographieanlage (Axiom Artis dBA, Siemens Healthineers, Forchheim, Deutschland) erhielten.

Hinsichtlich der endovaskulären Behandlung wurden zunächst standardmäßig über einen transfemorale Zugang die supraaortalen Arterien und/oder Sinus durchleuchtungsgesteuert sondiert. Die DSA-Übersichtsserien inklusive arterieller und venöser Phase am Anfang und Ende der Intervention wurden mit einem FOV von 32 cm im anteriorposterioren und lateralen Strahlengang sowie einer Bildfrequenz von 1-4 Bildern pro Sekunde, die periprozeduralen Arbeitsprojektionen in arterieller und frühvenöser Phase mit einem fokussierten FOV von 11-16 cm und einer erhöhten Bildfrequenz von 7.5 Bildern pro Sekunde (zur ausreichenden Visualisierung des AV-Shunts) angefertigt. Die Pulsfrequenz der Durchleuchtung betrug 7.5 Bilder pro Sekunde. Überdies wurden zwei vom Hersteller voreingestellte DSA-Protokolle verwendet: Niedrigdosis (Röhrenspannung 73 kV, Pulsweite 50 ms, Dosis 1820 μ Gy/Puls) und Normaldosis (Röhrenspannung 73 kV, Pulsweite 100 ms, Dosis 3000 μ Gy/Puls).

65/70 Patienten wurden elektiv und 5/70 Patienten notfallmäßig bei akuter Symptomatik behandelt (intracerebrale Blutung, n=3; subarachnoidale Blutung, n=1; akuter

Trigeminusausfall und Schwindel, n=1). Bzgl. der Cognard Klassifikation hatten 12/70 Patienten (17.1%) eine LDAVF Grad I, 4/70 (5.7%) Grad IIa, 17/70 (24.3%) Grad IIb, 10/70 (14.3%) Grad III, 26/70 (37.1%) Grad IV und 1/70 (1.4%) Grad V.

Hinsichtlich der Dosisparameter ergaben sich für die gesamte Studienpopulation ein medianes DFP von 325 Gy*cm² (25%; 75% Perzentile: 245; 414 Gy*cm²) und eine mediane Durchleuchtungszeit von 110 Minuten (68; 142 Minuten). Die höchsten medianen Dosiswerte fanden sich bei Cognard IIb Fisteln (DFP 372 Gy*cm², Durchleuchtungszeit 133 Minuten). Im Vergleich der Dosiswerte zwischen niedrig- und hochgradigen LDAVFs ergab sich kein signifikanter Unterschied (DFP, p=0.386; Durchleuchtungszeit, p=0.605). In Bezug auf die endovaskuläre Technik ergaben sich die niedrigsten Werte für die transvenöse Coilembolisation; bei dieser Behandlungsart waren sowohl das mediane DFP als auch die mediane Durchleuchtungszeit signifikant niedriger als bei einem kombinierten transarteriell-transvenösen Vorgehen (DFP 290 versus 388 Gy*cm², p=0.031; Durchleuchtungszeit 85 versus 170 Minuten, p=0.016). In der Gruppe der rein transarteriell mittels Flüssigembolisat behandelten LDAVFs (n=49) fand sich eine signifikante positive Korrelation zwischen der Anzahl der behandelten arteriellen Feeder und den Dosisparametern (DFP rs=.367, p=0.010; Durchleuchtungszeit rs=.295, p=0.040). Hinsichtlich des technischen Erfolges kalkulierten wir für komplett ausgeschaltete Durafisteln (n=28) signifikant niedrigere mediane Dosiswerte im Vergleich zu inkomplett embolisierten Fisteln (n=42) (DFP 285 versus 371 Gy*cm², p=0.008; Durchleuchtungszeit 82 versus 121 Minuten, p=0.004). Ein Niedrigdosis DSA-Protokoll wurde bei 45/70 Patienten (64.3%) verwendet und führte zu einem signifikant niedrigeren medianen DFP im Vergleich zur Gruppe mit einem Normaldosis DSA-Protokoll (n=25/70, 35.7%; 315 versus 393 Gy*cm², p=0.021).

Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser neuroradiologischen Dosisstudie berichten wir detailliert über dosimetrische Ergebnisse (DFP und Durchleuchtungszeit) bei der endovaskulären Behandlung von LDAVFs. Aus unserer Sicht sind diese Daten wichtig für die Formulierung von neuen DRLs im Feld der intrakraniellen Fistelbehandlung. Insgesamt variierten die Dosiswerte in unserer Studie erheblich je nach Behandlungart und verwendetem Dosisprotokoll. Da die endovaskuläre Behandlungstechnik durch die Fistelmorphologie und den Fistelgrad häufig weitgehend vordefiniert ist, besteht insbesondere durch die Wahl eines geeigneten Niedrigdosis-Protokolls großes Potential zur Dosisreduktion bei diesen speziellen, oft zeitintensiven Neurointerventionen.

2.2.4 Möglicher Einfluss der Dienstzeit auf das klinische Outcome nach mechanischer Rekanalisation von intrakraniellen Großgefäßverschlüssen

Teilprojekt 4: Zaeske C, Goertz L, Kottlors J, Schlamann M, Onur OA, Maus V, Mpotsaris A, Liebig T, **Forbrig R**, Kabbasch C, Abdullayev N. Mortality after mechanical thrombectomy in anterior circulation stroke may be higher at nighttime and on weekends. **Eur Radiol.** 2021;31:4148–55.

Journal Impact Factor: 5.315

Hintergrund und Zielsetzung

In einer 2018 publizierten Studie von Honeyford et al. zeigte sich, dass am Wochenende und/oder nachts aufgenommene Patienten und/oder durchgeführte Prozeduren ein schlechteres technisches und klinisches Outcome haben könnten (sog. „Wochenendeffekt“) [23]. Bei akutem Verschluss einer großen hirnversorgenden Arterie der vorderen Zirkulation fanden sich zuletzt Hinweise, dass bei im Rufdienst behandelten Patienten i) die Dauer zwischen Patientenaufnahme und mechanischer Rekanalisation länger und ii) das klinische Outcome schlechter sein könnte im Vergleich zu im Routinedienst rekanalisierten Patienten [29]. Als ursächlich für diesen Effekt wird neben einer geringeren Verfügbarkeit von medizinischen Kapazitäten insbesondere eine potentiell reduzierte Leistungsfähigkeit des Personals aufgrund der zirkadianen Rhythmik diskutiert. Überdies ist häufig von der „goldenen Stunde“ die Rede: Interventionen mit einer prozeduralen Dauer von mehr als 60 Minuten sind mit einer erhöhten Komplikationsrate assoziiert [39]. In diesem Zusammenhang stellt insbesondere auch eine erhöhte Röntgenbelastung ein gesundheitliches Risiko dar.

Das Ziel dieser retrospektiven Studie war, potentielle Unterschiede im prozeduralen Ablauf und im klinischen Outcome zu evaluieren bei Patienten mit akutem Verschluss einer hirnversorgenden Arterie, welche entweder zur Routinearbeitszeit oder im Nacht- und/oder Wochenenddienst notfallmäßig mittels durchleuchtungsgesteuerter mechanischer Rekanalisation behandelt wurden. Hierbei wurde der Fokus auf die beiden Dosisparameter DFP und Durchleuchtungszeit gelegt, welche zwischen den Gruppen und mit den vom BfS definierten DRLs verglichen wurden.

Methodik und Ergebnisse

Zwischen Oktober 2017 und März 2020 wurden insgesamt 246 Patienten eingeschlossen, bei denen eine mechanische Rekanalisation eines akuten intrakraniellen Großgefäßverschlusses der vorderen Zirkulation durchgeführt wurde. 102/246 (41%) wurden in der Routinearbeitszeit (Montag-Freitag 08:00-17:59 Uhr) behandelt, 38/246 (15%) im Tag-Rufdienst (Wochenende und gesetzliche Feiertage 08:00-17:59 Uhr), und 106/246 (43%) im Nacht-Rufdienst (18:00-07:59 Uhr). Hierbei wurden bis nach 18:00 Uhr dauernde Interventionen dem Nacht-Rufdienst zugeordnet. Zwischen den drei Gruppen ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Basisparameter (Alter, Geschlecht, kardiovaskuläre Risikofaktoren) und den Schlaganfall-spezifischen Parametern (Lokalisation des Gefäßverschlusses, Bildgebung (Alberta Stroke Program Early CT Score, ASPECTS), initiale Symptomatik (National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS; modified Rankin Scale, mRS) sowie Zeitintervall zwischen Symptombeginn und Patientenaufnahme) (jeweils $p > 0.05$).

Hinsichtlich der prozeduralen Auswertung ergab sich ein Trend hin zu einer höheren Rate an Thrombektomie-Manövern im Nacht-Rufdienst bei jedoch fehlender statistischer Signifikanz ($p > 0.05$). Der Vergleich der Dosisparameter DFP und Durchleuchtungszeit war zwischen den drei Gruppen ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich (jeweils $p > 0.05$). Das mediane DFP lag jeweils im Bereich der 25% Perzentile der laut BfS durchschnittlich anfallenden Röntgendosis bei der Thrombusaspiration ($51 \text{ Gy} \cdot \text{cm}^2$). In der Detailanalyse ergab sich, dass der vom BfS definierte DRL ($180 \text{ Gy} \cdot \text{cm}^2$) lediglich bei 3/246 Interventionen überschritten wurde. Der technische Erfolg der mechanischen Rekanalisation (modified treatment in cerebral ischemia score 2b oder 3) lag in allen drei Gruppen bei $> 90\%$ ($p > 0.05$). Hierbei fand sich kein signifikanter Unterschied im Zeitintervall Leistenpunkt-Rekanalisation ($p = 0.93$). Im postinterventionellen Kontroll-CT ergab sich keine signifikant unterschiedliche Rate an intrakraniellen Blutungskomplikationen (Subarachnoidalblutung $p = 0.2$, intracerebrale Blutung $p = 0.96$). Auch die Infarktgröße war zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich (medianer ASPECTS jeweils 7, $p = 0.55$).

Das Patienten-Outcome in der akut-postinterventionellen Phase war bei Patienten, welche im Rufdienst behandelt wurden, signifikant schlechter ($p = 0.02$). Im Detail verstarben 7% der im Routinedienst rekanalisierten Patienten im stationären Verlauf (7/102 Patienten) im Vergleich zu 16% (6/38) der im Tag-Rufdienst und 20% (21/106) der im Nacht-Rufdienst behandelten Patienten. Die häufigsten Todesursachen des Gesamtkollektivs waren Therapiebegrenzung aufgrund schweren Schlaganfalls ($n = 9/34$), Sepsis ($n = 8/34$) und respiratorische Insuffizienz

(n=7), wobei die beiden letztgenannten Ursachen am häufigsten bei im Nacht-Rufdienst behandelten Patienten dokumentiert wurden. Bei Entlassung und im Follow-Up nach drei Monaten ergab sich im klinischen Outcome kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen (NIHSS und mRS, jeweils $p>0.05$).

Schlussfolgerung

Unsere Daten deuten auf einen „Wochenendeffekt“ hin, da die akute postinterventionelle Mortalität bei Zustand nach mechanischer Rekanalisation eines intrakraniellen Großgefäßverschlusses der vorderen Zirkulation außerhalb der Routinearbeitszeiten signifikant erhöht war. Da neben den wichtigsten Basis-Charakteristika auch alle relevanten prozeduralen Parameter einschließlich der Röntgendosis, Interventionsdauer und technischen Erfolgsrate im Vergleich zum Routinedienst statistisch identisch waren, kann diese erhöhte Mortalität aus unserer Sicht nicht durch eine geringere prozedurale Qualität der mechanischen Rekanalisation im Rufdienst erklärt werden. Insbesondere lag die mediane Röntgendosis in unserem Kollektiv unabhängig von der Dienstzeit deutlich unterhalb des vom BfS definierten DRL. Inwieweit andere Faktoren außerhalb des Zuständigkeitsbereichs der behandelnden Neurointerventionalisten einen Einfluss auf das Patienten-Outcome haben könnten, sollte im Rahmen von weiteren, idealerweise multizentrischen Studien mit größeren Patientenkollektiven evaluiert werden.

2.2.5 Röntgendosis und Durchleuchtungszeit der diagnostischen Angiographie bei Patienten mit spinaler duraler arteriovenöser Fistel (SDAVF)

Teilprojekt 5: Ozpeynirci Y, Trumm CG, Stahl R. Fischer David, Liebig T, **Forbrig R.** Radiation Dose and Fluoroscopy Time of Diagnostic Angiography in Patients with Spinal Dural Arteriovenous Fistula. *Clin Neuroradiol.* 2022 Jan 7. doi: 10.1007/s00062-021-01130-1.

Journal Impact Factor: 3.649

Hintergrund und Zielsetzung

Im Vergleich zur durchleuchtungsgesteuerten Angiographie des Neurokraniums ist die spinale Angiographie oft mit einer höheren Röntgendosis assoziiert. Dies liegt neben der speziellen Gefäßanatomie insbesondere an dem vergleichsweise großen Volumen der zu untersuchenden Körperregionen [27]. Bei der SDAVF handelt es sich um die häufigste spinale vaskuläre Malformation (70%) und somit häufigste Indikation für eine diagnostische spinale Angiographie [25]. In diesem Zusammenhang ist die selektive spinale DSA der diagnostische Goldstandard und wesentlich für i) ein umfassendes Verständnis der dedizierten Fistelanatomie, ii) eine optimale Therapieplanung (vor neurochirurgischem Fistelverschluss) und iii) die postoperative Erfolgskontrolle. Eine vor der spinalen Angiographie akquirierte Magnetresonanztomographie (MRA) kann hilfreich sein zur Detektion des Fistelpunktes [26]; dennoch ist mitunter eine komplette spinale Angiographie einschließlich selektiver Katheterisierung sämtlicher Spinalarterien zwischen kraniozervikalem Übergang und Sakralkanal notwendig. In diesen Fällen kommt es folglich einerseits zu einer verlängerten Durchleuchtungszeit und erhöhten Röntgendosis und andererseits zu einem hohen Bedarf an jodhaltigem Kontrastmittel. Aus diesen Gründen ist es von besonderer Bedeutung, die Röntgendosis basierend auf dem ALARA Prinzip sowohl für den Patienten als auch das medizinische Personal zu limitieren. Überdies sollten in Einklang mit den EURATOM Regularien geeignete DRLs für diese speziellen durchleuchtungsgesteuerten Verfahren definiert werden [12].

In der Literatur existieren bisher nur wenig und eher heterogene dosimetrische Daten zu spinalen Angiographien, zudem fehlt in diesen Studien meist eine geeignete Subgruppenanalyse zur genauen Kategorisierung der vaskulären Pathologie [15, 30]. Das Ziel

dieser retrospektiven monozentrischen Studie war somit die Evaluation der Röntgendosis und Durchleuchtungszeit von diagnostischen spinalen Angiographien bei Patienten mit SDAVFs.

Methodik und Ergebnisse

Zwischen Dezember 2011 und Januar 2021 wurden 25 Patienten (6 weiblich, mittleres Alter 65 Jahre) eingeschlossen, bei denen insgesamt 62 diagnostische spinale Angiographien (30 präoperativ, 32 postoperativ) an einer biplanaren Angiographieranlage (Axiom Artis dBA, Siemens Healthineers, Forchheim, Deutschland) durchgeführt wurden.

Vor der ersten (d.h. präoperativen) spinalen Angiographie wurde bei allen Patienten eine Kontrastmittel-verstärkte MRA der spinalen Gefäße an einem 3 Tesla MRT (Signal, GE Healthcare, Chicago) durchgeführt. Falls der Fistelpunkt mittels spinaler MRA identifiziert werden konnte (MRA-positiv), begann die spinale Angiographie mit der selektiven Katheterisierung und Darstellung der dedizierten Fistel-zuführenden Segmentarterie. Jede präoperative Angiographie beinhaltete bilaterale Injektionen von mindestens fünf Wirbelkörperhöhen einschließlich der kontralateralen Segmentarterie in Höhe des Fistelpunktes und der paarigen Segmentarterien von jeweils zwei angrenzenden kranialen und kaudalen Höhen. Bei MRA-negativen Fällen begann die spinale Angiographie regelhaft in Höhe des thorakolumbalen Überganges und wurde segmental solange fortgesetzt, bis der Fistelpunkt identifiziert werden konnte. Die Segmentarterien wurden standardmäßig in anteriorposteriorem Strahlengang mit einer DSA-Bildfrequenz von 2-4 Bildern pro Sekunde bei einem FOV von 11-21 cm untersucht. Nach Auffinden der Fistel-zuführenden Arterie wurden zur genaueren Visualisierung des AV-Shunts bei Bedarf ergänzende DSA-Serien in unterschiedlichen Ebenen und einer höheren Bildfrequenz angefertigt. Die postoperative Angiographie beinhaltete bilaterale Injektionen in drei Wirbelkörperhöhen (Höhe der Fistel-zuführenden Segmentarterie und die jeweils kranial und kaudal angrenzende Höhe). Es standen zwei voreingestellte DSA-Protokolle zur Verfügung: Niedrigdosis (Röhrenspannung 73 kV, Pulsweite 50 ms, Dosis 1820 μ Gy/Puls) und Normaldosis (Röhrenspannung 73 kV, Pulsweite 100 ms, Dosis 3000 μ Gy/Puls).

Bei 5/25 (20%) Patienten war eine zweite präoperative Angiographie notwendig zur Identifikation des Fistelpunktes (reduzierte diagnostische Genauigkeit aufgrund starker Darmgasüberlagerung, n=1; technisch schwierige Sondierbarkeit der Segmentarterien bei fortgeschrittener Atherosklerose, n=2; unruhiger Patient, n=2). Bei 6/25 (24%) Patienten wurde mehr als eine postoperative Angiographie durchgeführt zur Bestätigung des definitiven

Fistelverschlusses (Rest- oder Rezidivfistel, n=4; persistierender klinischer und/oder bildgebender Verdacht auf Restfistel trotz angiographisch dokumentiertem Fistelverschluss, n=2).

Hinsichtlich der dosimetrischen Daten ergaben sich für die präoperative spinale Angiographie signifikant höhere Medianwerte im Vergleich zur postoperativen Angiographie sowohl für das DFP (223 versus 67 Gy*cm²) und die Durchleuchtungszeit (24 versus 8 Minuten) als auch die verabreichte Kontrastmittelmenge (200 versus 80 mL) (jeweils p<0.01). Als DRL-Werte (75%-Perzentile) dokumentierten wir 329.41 Gy*cm² für unspezifische (prä- und postoperativ), 395.59 Gy*cm² für präoperative und 138.6 Gy*cm² für postoperative spinale Angiographien. Hinsichtlich des Parameters „Fistellokalisierung“ (häufig, Th6-L2 versus selten, andere Höhen; Krings et al. [25]) fanden sich bei präoperativen Angiographien eine signifikant längere Durchleuchtungszeit (42.7 versus 28.5 Minuten, p=0.02) und signifikant höhere Anzahl an DSA-Serien (29.3 versus 24.8, p=0.04) für SDAVs an seltenen Lokalisationen. Jedoch waren die Werte für das DFP (p=0.3) und die verabreichte Kontrastmittelmenge (p=0.05) zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich. Überdies fand sich im präoperativen Gruppenvergleich ‚MRA-positiv versus MRA-negativ‘ kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der prozeduralen Parameter (DFP, Durchleuchtungszeit, Anzahl der DSA-Serien und Kontrastmittelmenge; jeweils p>0.05). Bei postoperativen Angiographien waren die dosimetrischen Werte für Fisteln an häufigen und seltenen Lokalisationen statistisch nicht signifikant unterschiedlich (p>0.05). Das Patientenalter hatte weder in den prä- noch postoperativen Angiographien einen signifikanten Einfluss auf die Dosisparameter.

Bei 25/62 (40.3%) Angiographien wurde ein Niedrigdosis DSA-Protokoll verwendet und bei 27/62 (43.6%) Angiographien ein Normaldosis DSA-Protokoll. Bei 10/62 (16.1%) Angiographien wurden beide DSA-Protokolle verwendet. Der mittlere Dosisindex (DFP pro DSA-Serie) war jeweils für die Niedrigdosis und Mischdosis-Gruppe signifikant niedriger im Vergleich zur Normaldosis-Gruppe (jeweils p<0.05). Die Dosisreduktion betrug hierbei 61% in der Niedrigdosis-Gruppe.

Schlussfolgerung

In dieser Studie berichten wir detailliert über eigene dosimetrische Daten (DFP und Durchleuchtungszeit) der diagnostischen spinalen Angiographie bei Patienten mit SDAVs. Diese Daten sind aus unserer Sicht wichtig zur Formulierung von neuen DRLs. Die

Dosisparameter waren bei präoperativen Angiographien signifikant höher als bei postoperativen Angiographien. Zudem war bei untypisch lokalisierten SDAVs die präoperative Durchleuchtungszeit signifikant verlängert. Die MRA-basierte Detektion des Fistelpunktes hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Dosisparameter. Ein dediziertes Niedrigdosis DSA-Protokoll ist gut geeignet zur Dosisreduktion bei diesen häufig zeitintensiven Untersuchungen.

3 Abkürzungsverzeichnis

ACI	Arteria carotis interna
ACOM	Anterior communicating artery
ALARA	As low as reasonably achievable
ASPECTS	Alberta Stroke Program Early CT Score
AV	Arteriovenös
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMI	Body mass index
CNR	Contrast-to-noise ratio
CT	Computertomographie
CTDI _{vol}	Volumetrischer CT-Dosisindex
CTF	CT-Fluoroskopie
DAVF	Durale arteriovenöse Fistel
DFP	Dosis-Flächen-Produkt
DLP	Dosis-Längen-Produkt
DRL	Diagnostic reference level
DSA	Digitale Subtraktionsangiographie
DSCT	Dual-Source Computertomographie
ED	Effektive Dosis
FD	Flow-Diverter
FOV	Field of view
HWI	Harnwegsinfekt
iCT	Intraoperative Computertomographie
LDAVF	Laterale durale arteriovenöse Fistel
MRA	Magnetresonanztomographie
mRS	Modified Rankin Scale
MRT	Magnetresonanztomographie
NIHSS	National Institutes of Health Stroke Scale
SDAVF	Spinale durale arteriovenöse Fistel
SSDE	Size-specific dose estimates
UIA	Unrupturiertes intrakranielles Aneurysma

4 Literaturverzeichnis

1. Achenbach S, Marwan M, Schepis T et al. High-pitch spiral acquisition: a new scan mode for coronary CT angiography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2009;3:117–21.
2. Acton H, James K, Kavanagh RG et al. Monitoring neurointerventional radiation doses using dose-tracking software: implications for the establishment of local diagnostic reference levels. *Eur Radiol*. 2018;28:3669–75.
3. Amacker NA, Mader C, Alkadhi H et al. Routine chest and abdominal high-pitch CT: an alternative low dose protocol with preserved image quality. *Eur J Radiol*. 2012;81:e392–97.
4. Aroua A, Rickli H, Stauffer JC et al. How to set up and apply reference levels in fluoroscopy at a national level. *Eur Radiol*. 2007;17:1621–33.
5. Bier G, Bongers MN, Hempel JM et al. Follow-up CT and CT angiography after intracranial aneurysm clipping and coiling improved image quality by iterative metal artifact reduction. *Neuroradiology*. 2017;59:649–54.
6. Bundesamt der Justiz und für Verbraucherschutz (2018). Strahlenschutzverordnung. https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/.
7. Bundesamt für Strahlenschutz (2016). Diagnostische Referenzwerte. http://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medicin/diagnostik/referenzwerte/referenzwerte_node.html.
8. Carlson SK, Bender CE, Classic KL et al. Benefits and safety of CT fluoroscopy in interventional radiologic procedures. *Radiology*. 2001;219:515–20.
9. Casillas-Sagrado E, Burguera V, Rioja-Martin ME et al. Infected renal cyst presented with pleural effusion in a woman with autosomal dominant polycystic kidney disease. *Clin Kidney J*. 2018;11:204–6.
10. Christner JA, Braun NN, Jacobsen MC et al. Size-specific dose estimates for adult patients at CT of the torso. *Radiology*. 2012;265:841–47.
11. Cognard C, Gobin YP, Pierot L et al. Cerebral dural arteriovenous fistulas: clinical and angiographic correlation with a revised classification of venous drainage. *Radiology*. 1995;194:671–80.
12. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013. Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Official Journal of the European Union. 2013; <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CELEX-32013L0059-EN-TXT.pdf>.
13. Eigenbrod S, Trabold R, Brucker D et al. Molecular stereotactic biopsy technique improves diagnostic accuracy and enables personalized treatment strategies in glioma patients. *Acta Neurochir (Wien)*. 2014;156:1427–40.
14. Ertl L, Brückmann H, Kunz M et al. Endovascular therapy of low- and intermediate-grade intracranial lateral dural arteriovenous fistulas: a detailed analysis of primary success rates, complication rates, and long-term follow-up of different technical approaches. *J Neurosurg*. 2017;126:360–7.
15. Etard C, Bigand E, Salvat C et al. Patient dose in interventional radiology: a multicentre study of the most frequent procedures in France. *Eur Radiol*. 2017;27:4281–90.
16. Forbrig R, Geyer LL, Stahl R et al. Radiation dose and image quality in intraoperative CT (iCT) angiography of the brain with stereotactic head frames. *Eur Radiol*. 2019;29:2859–67.
17. Forbrig R, Ingrisich M, Stahl R et al. Radiation dose and image quality of high-pitch emergency abdominal CT in obese patients using third-generation dual-source CT (DSCT). *Sci Rep*. 2019;9:15877.
18. Forbrig R, Ozpeynirci Y, Grasser M et al. Radiation dose and fluoroscopy time of modern endovascular treatment techniques in patients with saccular unruptured intracranial aneurysms. *Eur Radiol*. 2020;30:4504–13.
19. Forbrig R, Stahl R, Geyer LL et al. Radiation Dose and Fluoroscopy Time of Endovascular Treatment in Patients with Intracranial Lateral Dural Arteriovenous Fistulae. *Clin Neuroradiol*. 2021;31:1149–57.

20. Geyer LL, Schoepf UJ, Meinel FG et al. State of the art: iterative CT reconstruction techniques. *Radiology*. 2015;276:339–57.
21. Goertz L, Dorn F, Kraus B et al. Safety and efficacy of the Derivo Embolization Device for the treatment of ruptured intracranial aneurysms. *J Neurointerv Surg*. 2019;11:290–95.
22. Grasbon-Frodl EM, Kreth FW, Ruiter M et al. Intratumoral homogeneity of MGMT promoter hypermethylation as demonstrated in serial stereotactic specimens from anaplastic astrocytomas and glioblastomas. *Int J Cancer*. 2007;121:2458–64.
23. Honeyford K, Cecil E, Lo M et al. The weekend effect: does hospital mortality differ by day of the week? A systematic review and meta-analysis. *BMC Health Serv Res*. 2018;18:870.
24. Ifergan J, Pommier R, Brion MC et al. Imaging in upper urinary tract infections. *Diagn Interv Imaging*. 2012;93:509–19.
25. Krings T, Geibprasert S. Spinal dural arteriovenous fistulas. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2009;30:639–48.
26. Luetmer PH, Lane JJ, Gilbertson JR et al. Preangiographic evaluation of spinal dural arteriovenous fistulas with elliptic centric contrast-enhanced MR Angiography and effect on radiation dose and volume of iodinated contrast material. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2005;26:711–8.
27. Miller DL, Kwon D, Bonavia GH. Reference levels for patient radiation doses in interventional radiology: proposed initial values for U.S. practice. *Radiology*. 2009;253:753–64.
28. Morris AD, Evans AF. Percutaneous aspiration and drainage of an infected renal cyst. *Br J Urol*. 1984;56:227–8.
29. Ogbu UC, Westert GP, Slobbe LC et al. A multifaceted look at time of admission and its impact on case fatality among a cohort of ischaemic stroke patients. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2011;82:8–13.
30. Opitz M, Zensen S, Bos D et al. Radiation exposure in the endovascular therapy of cranial and spinal dural arteriovenous fistula in the last decade: a retrospective, single-center observational study. 2021 Sep 27. doi: 10.1007/s00234-021-02816-6.
31. Ozpeynirci Y, Hutschenreuter B, Forbrig R et al. Endovascular treatment of basilar tip aneurysms in the era of endosaccular flow disruption: a comparative study. *Neuroradiology*. 2021;63:619–26.
32. Ozpeynirci Y, Trumm CG, Stahl R et al. Radiation Dose and Fluoroscopy Time of Diagnostic Angiography in Patients with Spinal Dural Arteriovenous Fistula. *Clin Neuroradiol*. 2022 Jan 7. doi: 10.1007/s00062-021-01130-1.
33. Pierot L, Moret J, Barreau X et al. Safety and efficacy of aneurysm treatment with WEB in the cumulative population of three prospective, multicenter series. *J Neurointerv Surg*. 2018;10:553–9.
34. Sabel BO, Buric K, Karara N et al. High-Pitch CT Pulmonary Angiography in Third Generation Dual-Source CT: Image Quality in an Unselected Patient Population. *PLoS One*. 2016;11:e0146949.
35. Shalit MN, Israeli Y, Matz S et al. Experience with intraoperative CT scanning in brain tumors. *Surg Neurol*. 1982;17:376–82.
36. Siemens Healthineers. SOMATOM Force.
<https://www.siemens-healthineers.com/de/computed-tomography/dual-source-ct/somatom-force>
37. Sirinek KR. Diagnosis and Treatment of Intra-Abdominal Abscesses. *Surg Infect*. 2000;1:31–8.
38. Spearman JV, Schoepf UJ, Rottenkolber M et al. Effect of Automated Attenuation-based Tube Voltage Selection on Radiation Dose at CT: An Observational Study on a Global Scale. *Radiology*. 2016;279:167–74.
39. Spiotta AM, Vargas J, Turner R et al. The golden hour of stroke intervention: effect of thrombectomy procedural time in acute ischemic stroke on outcome. *J Neurointerv Surg*. 2014;6:511–6.
40. Terpolilli NA, Rachinger W, Kunz M et al. Orbit-associated tumors: navigation and control of resection using intraoperative computed tomography. *J Neurosurg*. 2016;124:1319–27.

41. Trumm CG, Burgard C, Deger C et al. Intermittent quick-check CT fluoroscopy-guided percutaneous drainage placement in patients with infected renal and perirenal fluid collections: 11-year experience. *Diagn Interv Radiol*. 2021;27:378–85.
42. Vañó E, Miller DL, Martin CJ et al. ICRP Publication 135: diagnostic reference levels in medical imaging. *Ann ICRP*. 2017;46:1–144.
43. Wallace MJ, Chin KW, Fletcher TB et al. Quality Improvement Guidelines for Percutaneous Drainage/Aspiration of Abscess and Fluid Collections. *J Vasc Interv Radiol*. 2010;21:431–5.
44. Wenz H, Maros ME, Meyer M et al. Intra-individual diagnostic image quality and organ-specific-radiation dose comparison between spiral cCT with iterative image reconstruction and z-axis automated tube current modulation and sequential cCT. *Eur J Radiol Open*. 2016;3:182–90.
45. Winter KS, Greif V, Crispin A et al. CT-Guided Drainage of Fluid Collections Following Liver Resection: Technical and Clinical Outcome of 143 Patients during a 14-Year Period. *Diagnostics (Basel)*. 2021;11:826.
46. Zaeske C, Goertz L, Kottlors J et al. Mortality after mechanical thrombectomy in anterior circulation stroke may be higher at nighttime and on weekends. *Eur Radiol*. 2021;31:4148–55.