

Persönliche Strahlenschutzmittel und Dosimetrie des medizinischen Personals in der interventionellen Radiologie: Aktueller Status und neue Entwicklungen

Personal Radiation Protection and Corresponding Dosimetry in Interventional Radiology: An Overview and Future Developments

Autoren

Alexander Marc König¹, Robin Etzel², Rohit Philip Thomas¹, Andreas H. Mahnken¹

Institute

- 1 Diagnostic and Interventional Radiology, Philipps-University Marburg, Germany
- 2 Institute of Medical Physics and Radiation Protection, Mittelhessen University of Applied Sciences, Giessen, Germany

Key words

interventional procedures, physics, radiation effects, radiation safety, safety

eingereicht 09.02.2018

akzeptiert 01.11.2018

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-0800-0113>

Online-Publikation: 31.1.2019

Fortschr Röntgenstr 2019; 191: 512–521

© Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart · New York

ISSN 1438-9029

Korrespondenzadresse

Alexander Marc König

Department of Diagnostic Radiology, Philipps-University Marburg, Baldingerstrasse, 35043 Marburg, Germany

Tel.: ++ 49/64 21/58/6 59 93

Fax: ++ 49/64 21/58/6 89 59

AKoenig@med.uni-marburg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund Röntgenstrahlen haben ein sehr breites Anwendungsspektrum in der Medizin. Mit dem Trend zu minimalinvasiven Eingriffen steigen besonders die Zahlen Computertomografie- (CT) und durchleuchtungsgesteuerter Interventionen. Mit der zunehmenden Komplexität der Eingriffe steigt außerdem die Untersuchungsdauer und damit häufig auch die Expositionszeit. Um das medizinische Personal vor allem vor der Streustrahlung zu schützen, gibt es eine Vielzahl von persönlichen Strahlenschutzmitteln. Diese Übersichtsarbeit soll einen Überblick über die verfügbaren Systeme, ihre Effektivität bezüglich des persönlichen Strahlenschutzes und der entsprechenden Dosimetrie geben.

Methode Literaturrecherche, vor allem in pubmed mit den Schlüsselwörtern: Strahlenschutz, Augenlinsendosis, Strahlenexposition in der interventionellen Radiologie, Katarakt, Tumorrisiko, Dosimetrie in der interventionellen Radiologie und Strahlendosimetrie.

Ergebnisse und Schlussfolgerung Ein optimaler Strahlenschutz sieht immer eine Kombination aus unterschiedlichen Strahlenschutzmitteln bzw. Methoden vor. Der Strahlenschutz und das Monitoring des Kopf-Hals-Bereichs, vor allem der Augenlinse, hat weiterhin Entwicklungs- und Akzeptanzbedarf. Hier werden neue Bleiglas-Brillen mit integrierten Dosimetern erwartet, damit zukünftig die genaue Dosis bestimmt und somit das Kataraktrisiko reduziert werden kann.

Kernaussagen:

- Die richtige Kombination aus Strahlenschutzmittel und entsprechender Dosimetrie erhöht die Sicherheit beim Umgang mit Röntgenstrahlen.

Zitierweise

- König AM, Etzel R, Thomas RP et al. Personal Radiation Protection and Corresponding Dosimetry in Interventional Radiology: An Overview and Future Developments. Fortschr Röntgenstr 2019; 191: 512–521

ABSTRACT

Background The increasing number of minimally invasive fluoroscopy-guided interventions is likely to result in higher radiation exposure for interventional radiologists and medical staff. Not only the number of procedures but also the complexity of these procedures and therefore the exposure time as well are growing. There are various radiation protection means for protecting medical staff against scatter radiation. This article will provide an overview of the different protection devices, their efficacy in terms of radiation protection and the corresponding dosimetry.

Method The following key words were used to search the literature: radiation protection, eye lens dose, radiation exposure in interventional radiology, cataract, cancer risk, dosimetry in interventional radiology, radiation dosimetry.

Results and Conclusion Optimal radiation protection always requires a combination of different radiation protection

devices. Radiation protection and monitoring of the head and neck, especially of the eye lenses, is not yet sufficiently accepted and further development is needed in this field. To reduce

the risk of cataract, new protection glasses with an integrated dosimeter are to be introduced in clinical routine practice.

Einleitung/Hintergrund

Am 8. November 1895 entdeckte der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen die nach ihm benannte Röntgenstrahlung. Schon kurz nach ihrer Entdeckung wurden die diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten erkannt und schnell weiterentwickelt. Schon im Folgejahr nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung und der klinischen Anwendung wurden die ersten akuten Strahlenschäden beobachtet. Hierbei handelte es sich meistens um Strahlenschäden der Haut, wie Haarausfall und Dermatitis. Auch von Augenirritationen wird schon in diesem Jahr berichtet [1]. Hierbei handelt es sich um deterministische Strahlenschäden; dies bedeutet, dass es nach dem Überschreiten einer Schwellendosis zu einem Gewebeschaden kommt. Erst 1902 konnte gezeigt werden, dass eine permanente Strahlenbelastung ein Karzinom der Haut verursachen kann [2]. Hierbei handelt es sich um einen stochastischen Strahlenschaden, der zufällig auftritt und auf die Veränderung der DNA zurückzuführen ist. Mit zunehmender Strahlenexposition steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Strahlenschaden näherungsweise linear an. 1904 wurde erstmals von einer Röntgendermatitis der Radiologen und Röntgentechniker, die durch eine chronische Strahlenbelastung hervorgerufen wird, berichtet [3]. Schon 1898 wurden daher die ersten Strahlenschutzmaßnahmen in Form einer Abschirmung der Röntgenröhre selbst präsentiert [4]. 1905 wurden dann die ersten persönlichen Strahlenschutzmaßnahmen in Form von Schutzhandschuhen, Bleimänteln, Bartschutz, Schutzmützen und Bleibrillen empfohlen [5]. Auch ein mit Blei verkleidetes Schutzhäuschen für das Bedienungspersonal wurde konstruiert. Mit der am 2. Mai 1905 gegründeten Deutschen Röntgengesellschaft wurde unter anderem eine Regelung für den Strahlenschutz und der entsprechenden Dosimetrie verfolgt und im Folgejahr gesetzlich manifestiert. 1913 wurde von der Deutschen Röntgengesellschaft die erste zusammenfassende allgemeine Strahlenschutzempfehlung herausgegeben. In den folgenden Jahren wurde der Strahlenschutz in allen Bereichen weiterentwickelt, vor allem aufgrund der immer besseren Messtechnik und der steigenden Erfahrung, besonders im Bereich der Langzeitschäden [6].

Die Verwendung der Röntgenstrahlung hat heutzutage ein sehr breites Anwendungsspektrum in der Medizin. Mit dem Trend zu minimalinvasiven Eingriffen steigen besonders in der radiologischen, neuroradiologischen und kardiologischen sowie in der orthopädischen und vaskulären Intervention mittels der Röntgendurchleuchtung die Anzahl und, aufgrund der zunehmenden Komplexität, die Untersuchungsdauer [7, 8]. Die meisten Untersuchungen zum persönlichen Strahlenschutz konzentrieren sich auf diesen Bereich, aber auch die CT-gesteuerten Interventionen nehmen zu und decken heute ein breites Anwendungsspektrum ab [9]. Mit diesem Trend steigt auch die berufliche Exposition des medizinischen Personals mit Röntgenstrahlung.

Die Folgen einer langjährigen Exposition mit Röntgenstrahlung niedriger effektiver Dosis ist noch immer Bestandteil aktueller Studien und wird weiterhin kontrovers diskutiert. Während einige aktuelle Studien kein erhöhtes Risiko für eine maligne Erkrankung von medizintechnischen Radiologie-Assistenten nachweisen können [10, 11], zeigen andere Studien z. B. ein 2-fach erhöhtes Risiko für einen Gehirntumor und ein moderat erhöhtes Risiko für ein Melanom und einen Brusttumor [12]. Ein weit weniger umstrittener Folgeschaden einer langjährigen Strahlenbelastung ist die Entstehung einer Katarakt. Die Ergebnisse von Seals et al. deuten darauf hin, dass es sich bei der Kataraktentstehung am ehesten um einen stochastischen Effekt handelt und nicht, wie lange angenommen, um einen deterministischen [13].

In der neuen Richtlinie der Europäischen Atomgesellschaft (EURATOM) 2013 wurde diese Datenlage berücksichtigt (Richtlinie 2013/59/Euratom) und soll den medizinischen Strahlenschutz weiter verbessern. Diese muss im Jahr 2018 in das nationale Recht umgesetzt werden und tritt zum 31.12.2018 in Kraft. Hier ist vor allem der neue Grenzwert für die Augenlinsen hervorzuheben, welcher von 150 mSv/Jahr auf 20 mSv/Jahr reduziert wird. Eine Gegenüberstellung der Dosisgrenzwerte der noch gültigen Röntgenverordnung und des neuen Strahlenschutzgesetzes ist in ► **Tab. 1** aufgeführt.

Strahlenschutz

Allgemeine Prinzipien

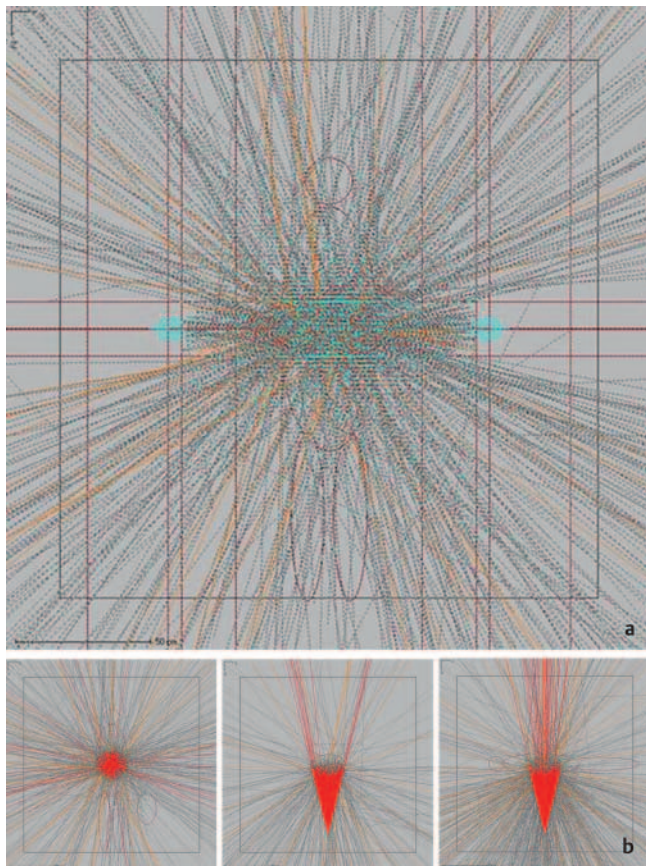
Im Strahlenschutz gilt grundsätzlich das „ALARA“ (as low as reasonably achievable)-Prinzip; dies bedeutet, die verwendete ionisierende Strahlung so gering, wie es mit vernünftigen Mitteln machbar ist, zu halten. Ein weiterer Grundsatz des Strahlenschutzes ist das Abstandsquadratgesetz. Es besagt, dass die Dosisleistung pro Fläche umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands abnimmt. Dies bedeutet, dass sich bei einer Verdoppelung des Abstands zur Strahlenquelle die Dosisleistung auf ein Viertel reduziert. Für alle Interventionen, die Röntgenstrahlung verwenden, muss darauf geachtet werden, dass der Untersucher nicht im Primärstrahl arbeitet. Der überwiegende Teil der Personendosis des Untersuchers wird durch die Streustrahlung, welche im Wesentlichen vom Patienten ausgeht, hervorgerufen (► **Abb. 1**).

Davon abgesehen hat der Strahlenschutz eine weite Bandbreite und kann allgemein in 3 Hauptbereiche unterteilt werden:

- den gerätetechnischen Strahlenschutz,
- den baulichen Strahlenschutz und
- den persönlichen Strahlenschutz.

► **Tab. 1** Eine Gegenüberstellung der Dosisgrenzwerte der Röntgenverordnung und des neuen Strahlenschutzgesetzes bei beruflicher Strahlenexposition der Kategorie A.

	Röntgenverordnung Grenzwert	neues Strahlenschutzgesetz Grenzwert
gesamte Körperdosis	20 mSv pro Jahr Ausnahme: 50 mSv pro Jahr (in 5 aufeinanderfolgenden Jahren nicht > 100 mSv)	20 mSv pro Jahr Ausnahme: 50 mSv pro Jahr (in 5 aufeinanderfolgenden Jahren nicht > 100 mSv)
Augenlinse	150 mSv pro Jahr	20 mSv pro Jahr
lokale Hautdosis	500 mSv pro Jahr	500 mSv pro Jahr (gemittelt über eine beliebige Hautfläche von 1 Quadratzentimeter)
Hände, Unterarme, Füße, Knöchel	500 mSv pro Jahr	500 mSv pro Jahr
Keimdrüsen, Gebärmutter, Knochenmark	50 mSv pro Jahr	Nicht mehr benannt
Schilddrüse, Knochenoberfläche	300 mSv pro Jahr	nicht mehr benannt
Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre	150 mSv pro Jahr	nicht mehr benannt
Berufslebensdosis (Die Behörde kann mit schriftlicher Einwilligung der strahlenexponierten Person eine zusätzliche Exposition zulassen)	400 mSv Ausnahme nach Erreichen der Berufslebensdosis: maximal zusätzlich 10 mSv pro Jahr	400 mSv Ausnahme nach Erreichen der Berufslebensdosis: maximal zusätzlich 10 mSv pro Jahr



► **Abb. 1** a Simulation der Streustrahlung bei einer CT-Untersuchung (Aufsicht). b Simulation der Streustrahlung bei einer angiografischen Untersuchung (v.l.n.r.: Aufsicht, axiale Ansicht und Seitenansicht). Für die Simulationen wurde die Software EGS-Ray (C. Kleinschmidt, Universität Köln) verwendet mit folgenden Hauptparametern: 80 kV Röntgenspektrum (Photonen); Datensätze aus ICRU-Bericht 521.

Dieser Artikel soll einen Überblick (► **Tab. 2**) über die verfügbaren persönlichen Strahlenschutzmittel, deren Effektivität und einen Ausblick auf neue Entwicklungen und zukünftige Trends geben.

Geräteseitige Strahlenschutzmittel zum Schutz des medizinischen Personals

Mobile Bleiglasscheibe

Bleiglasscheiben sind gemäß ihrer Verwendung unterschiedlich geformt und bestehen in den meisten Fällen aus Acrylglas und Bleioxid. Sie haben meistens einen Bleigleichwert von 0,5 mm. Das bedeutet, dass die Acrylglasscheibe in Verbindung mit dem Bleioxid Röntgenstrahlung genauso abschirmt wie eine 0,5 mm dicke Bleiabschirmung. Solch eine mobile, meist deckenmontierte Bleiglasscheibe (► **Abb. 2**), welche den Untersucher vor allem im Bereich des Oberkörpers vor einer zusätzlichen Strahlenexposition schützt, kann eine Reduktion der Ortsdosis von 50–60 % im Bereich des Kopf-Halses bzw. der Augenlinse erreichen [14–16]. Abhängig von der Angulation der Röntgenröhre kann die Strahlenexposition sogar um 90–98 % reduziert werden. Dieses ist vor allem, wenn sich die Röntgenröhre auf der gleichen Seite befindet wie der Untersucher, da hier aufgrund der Streustrahlengeometrie eine hohe Ortsdosis im Bereich des Oberkörpers des Untersuchers erreicht wird. In Bezug auf die Augenlinse konnte in Phantomexperimenten und Simulationen eine Reduktion der Ortsdosis um 50,0–96,7 % bei alleiniger Verwendung der mobilen Bleiglasscheibe gezeigt werden [16–23]. Dieses System kann noch weiter verbessert werden, wenn die effektive Fläche der Scheibe vergrößert wird und zusätzlich an der Unterseite Bleilamellen angebracht werden. Gilligan et al. konnten so eine Reduktion der Ortsdosis am Hals des Untersuchers von 15,4 μ Sv auf 7,3 μ Sv (52,6 %) pro Untersuchung feststellen [24].

► **Tab.2** Überblick über verschiedene Strahlenschutzmittel und deren Effektivität.

	Modalität	Studie	Körperregion	Dosisreduktion [%]
Mobile Bleiglasscheibe	Angiografie	14, 15, 16	Kopf, Hals und Augenlinse	50,0 – 60,0
	Angiografie	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23	Augenlinse	50,0 – 96,7
	Angiografie	24	Hals	52,6 (15,4 µSv auf 7,3 µSv)
Untertischbleivorhang	Angiografie	16, 25, 26	untere Extremitäten	64,0 (5,54 mSv auf 1,98 mSv)
	Computertomografie	27	untere Extremitäten	38,2
+ Bleivorhang an der Gantry	Computertomografie	28	Oberkörper	85,6
			Gonaden	93,3 (25,4 µGy auf 1,7 µGy)
			Hände	85,1
Mobile Strahlenschutzwand	Angiografie	15	Abdomen	96,1 (0° Angulation)
				88,0 (laterale Angulation)
+ Strahlenschutz auf dem Patienten				98,9
	Computertomografie	29		84,0
Streustrahlenschutz auf dem Patienten	Angiografie	16, 30, 31	Auge	91,7
			Schilddrüse	96,0
			Hände	96,6
Strahlenschutzweste	Angiografie	32	Thorax	56,9 (20,9 µSv auf 9,0 µSv)
	allgemein	34		80,0 (Rundumschürze vs. Frontschürze)
Schilddrüsenschutz	allgemein	16, 40, 41	Schilddrüse	90,7 (alternative Materialien)
				72,4 (auf Blei basierend)
Frei hängendes Strahlenschutzsystem	Angiografie	44	Kopf-Hals-Bereich	94,0 (im Gegensatz zur Strahlenschutzschürze)
Bleiglasbrille	Angiografie	17, 18, 19	Auge	66,7 – 96,0
	Angiografie	22, 46	Auge	50,0
+ mobile Bleiglasscheibe				82,5
Bleiglasvisiere	Angiografie	17	Auge	85,0 – 90,0
Strahlenschutzhaube	Angiografie	40	Kopf	85,4 (224 µSv auf 48 µSv)
	Angiografie	45, 46	Kopf	3,3
Strahlenschutzhandschuhe	Computertomografie	28	Hand	97,1 (1792 µGy auf 52 µGy)
	Angiografie	48	Hand	42,6
im Strahlengang		48	Hand	Erhöhung um 64,5

Untertischbleivorhang

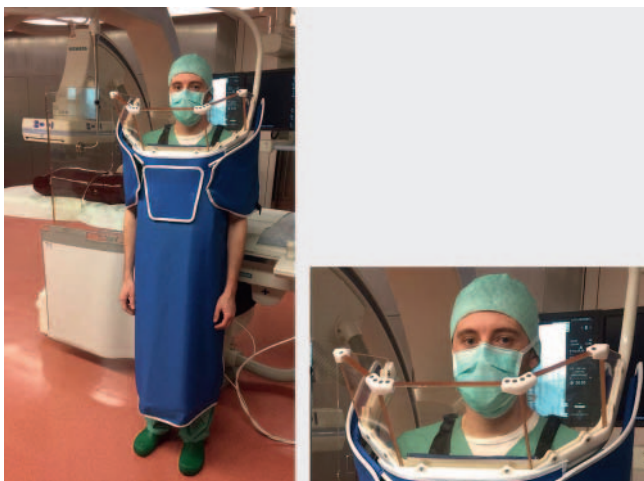
Ein am Patiententisch fixierter Untertischbleivorhang schützt den Untersucher vor allem im Bereich der unteren Extremitäten (► **Abb. 2**). Diese Vorhänge bestehen entweder aus einem durchgängigen Material oder aus Lamellen, welche eine bessere Anpassung an den Untersucher gewährleisten. Weiterhin reichen diese Vorhänge in den meisten Fällen nach oben über den Patiententisch hinaus, um die Streustrahlung, welche seitlich aus dem Patienten austritt, abzuschirmen. In der Regel haben diese Materialien einen Bleigleichwert von 0,5 mm. In einigen Studien konnte eine Reduktion der Ortsdosis im Bereich der unteren

Extremitäten des Untersuchers von bis zu 64 % (im Mittel von 5,54 mSv auf 1,98 mSv) gezeigt werden [16, 25, 26].

Auch bei interventionellen Untersuchungen am Computertomografen konnte bei einem experimentellen Untertischbleivorhang eine Reduktion der Ortsdosis an den unteren Extremitäten von 38,2 % gezeigt werden [27]. Neeman et al. konnten weiterhin zeigen, dass eine maximale Reduktion der Ortsdosis von 85,6 % auf Höhe des Oberkörpers, 93,3 % (im Mittel von 25,4 µGy auf 1,7 µGy) an den Gonaden und 85,1 % an den Händen erreicht werden kann, wenn zusätzlich zu dem Untertischbleivorhang ein Bleivorhang im Bereich der Gantry verwendet wird [28].



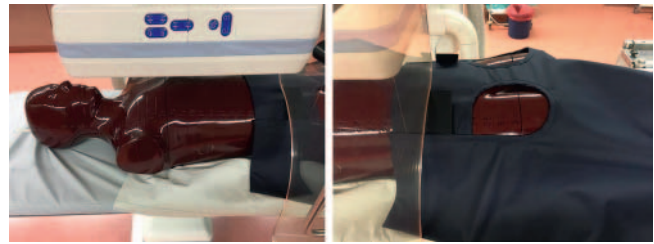
► **Abb. 2** Bleiweste und -rock mit Schilddrüsenschutz, Bleiglas-Brille und Strahlenschutzhaube. Im Hintergrund sind die mobile Bleiglasscheibe und der Untertischbleivorhang zu sehen.



► **Abb. 3** Frei hängendes Strahlenschutzsystem mit integrierter Bleiglasscheibe. Im Hintergrund sind die mobile Bleiglasscheibe und der Untertischbleivorhang zu sehen.

Mobile Strahlenschutzwand

Mobile Strahlenschutzwände gibt es in den unterschiedlichsten Größen, Formen und Ausführungen. Im Wesentlichen können halbhohe Wände, die bis einschließlich des Abdomens den Untersucher vor Streustrahlung schützen, von Wänden in Körpergröße, meist mit einem Fenster versehen oder vollständig aus durchsichtigem Material gefertigt, unterschieden werden. Diese mobilen Strahlenschutzwände, meist mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm, können die Dosisleistung um 96,1 % (umgerechnete Mittelwerte aus Luftkerma: 245,6 $\mu\text{Gy/h}$ auf 9,5 $\mu\text{Gy/h}$) reduzieren, wenn eine Angulation der Röntgenröhre von 0° verwendet wird. Bei einer lateralen Angulation nach links (Röntgenröhre auf der Messkammer



► **Abb. 4** Strahlenschutz auf dem Patienten mit Ausschnitten für den femoralen Zugang.

zugewandten Seite) beträgt die Reduktion der Dosisleistung nur noch 88% (umgerechnete Mittelwerte aus Luftkerma: 160,5 $\mu\text{Gy/h}$ auf 19,3 $\mu\text{Gy/h}$). Wird eine solche mobile Strahlenschutzwand mit einem Strahlenschutz direkt auf dem Patienten kombiniert, kann die Dosisleistung sogar um bis zu 98,9% (umgerechnete Mittelwerte aus Luftkerma: 245,6 $\mu\text{Gy/h}$ auf 3 $\mu\text{Gy/h}$) reduziert werden [15]. Bei CT-gesteuerten Interventionen kann eine Reduktion der Dosisleistung im Mittel von 84 % erreicht werden, wenn eine Strahlenschutzwand verwendet wird, jedoch ist dann der direkte Zugang zum Patienten stark eingeschränkt [29].

Streustrahlenschutz auf dem Patienten

Ein weiterer Ansatz, die Streustrahlung zu reduzieren, ist, sie direkt an der Quelle, dem Patienten, abzuschirmen. Dieses kann mithilfe von sterilen Abdeckungen, welche mit z. B. Bismuth versehen sind, bis hin zu auf Blei basierenden Strahlenschutzmatten geschehen (► **Abb. 4**). Des Weiteren gibt es verschiedenste Formen, von einer Verlängerung der mobilen Bleiglasscheibe oder der dem Untersucher zugewandten seitlichen Abdeckung, bis hin zur vollständigen Abdeckung des Patienten, wie es in ► **Abb. 4** zu sehen ist. Aus Bismuth bestehende Abdeckungen mit einem Bleigleichwert von 0,1 mm zeigen eine Reduktion der Strahlendosis bis 91 % für die Augen, 96 % für die Schilddrüse und 96 % für die Hände [16, 30, 31]. Lange et al. konnten in ihrer Studie im Mittel eine Reduktion der Personendosis von 20,9 μSv auf 9,0 μSv (56,9 %) messen, wenn eine Strahlenschutzmatte mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm auf dem Patienten verwendet wurde [32]. Bei dieser Anwendung ist jedoch darauf zu achten, dass die Abdeckungen bei eingeschalteter Dosisautomatik außerhalb des primären Röntgenstrahls verwendet werden, da es ansonsten zu einer erhöhten Strahlenexposition, sowohl des Patienten, als auch des medizinischen Personals, kommt, was den Nutzen in das Gegenteil umkehrt. Diese Dosisautomatik kann in der Regel deaktiviert werden.

Persönliche Strahlenschutzmittel des medizinischen Personals

Strahlenschutzweste und Schilddrüsenschutz

Der konventionelle Strahlenschutz des medizinischen Personals besteht in der Regel aus einer auf Blei basierenden, bleireduzierten oder bleifreien Schürze bzw. aus einer Weste und einem Rock und

einem Schilddrüsenschutz (► **Abb. 2**) mit unterschiedlichen Bleigleichwerten. Lynskey et al. bestätigen in einer Umfrage, dass 99,4% der befragten interventionellen Radiologen eine Strahlenschutzweste tragen und 94% einen Schilddrüsenschutz nutzen [33].

Toossi et al. konnten in einem Vergleich unterschiedlicher, auf Blei basierender Schürzen zeigen, dass Einteiler mit Überlappung im Frontbereich und einem Bleigleichwert von 0,35 mm (im Frontbereich somit effektiv 0,7 mm) den besten Schutz gewähren. Zudem wird beschrieben, dass eine Rundumschürze einen 5-fach besseren Strahlenschutz bietet als eine Frontschürze. Der Schilddrüsenschutz sollte einen Bleigleichwert von 0,5 mm haben und eine möglichst große Fläche abdecken [34]. Da gerade Bleischürzen schwer und brüchig sind und bei täglicher Anwendung zu körperlichen Beschwerden, vor allem des Rückens und der Hüfte [35–37], führen können, gibt es leichtere Schürzen aus alternativen Materialien. Diese basieren meist auf einer Kombination aus Bismuth, Gadolinium und/oder Bariumsulfat und sind etwa ein Viertel bis ein Drittel leichter als die konventionellen Bleischürzen. Kazempour et al. konnte in einer Simulation zeigen, dass Bleischürzen bei Energien von 40kVp am besten abschirmen, wohingegen die Kombination aus W-Sn-Cd-EPVC am besten bei 60 und 90 kVp und W-Sn-Ba-EPVC bei Energien von 120 kVp schützen (Pb-Blei; Si-Silizium; W-Wolfram; Sn-Zinn; Cd-Cadmium; Ba-Barium; EPVC-Emulation Polyvinylchlorid) [38]. Hierbei spielen die Absorptionskanten, also Energiebereiche, bei denen die Absorption sprunghaft ansteigt, der unterschiedlichen Materialien eine entscheidende Rolle. Dieses zeigt, dass neben Blei auch andere Materialien in der Lage sind, einen adäquaten Strahlenschutz bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion zu gewährleisten. Letzteres ist jedoch von der verwendeten Energie abhängig [39], d. h. die Effektivität der Strahlenschutzmittel ist abhängig von der Röhrenspannung und kann nicht zwangsläufig allein über den Bleigleichwert angegeben werden. Entsprechend gibt es alternative Materialien für den Schilddrüsenschutz. Uthoff et al. zeigen in ihren klinischen Studien, dass die alternativen Materialien, bestehend aus Bariumsulfat und Bismuthoxid, im Mittel einen gleichen Strahlenschutz gewähren wie der Schilddrüsenschutz aus Blei. Werden diese Materialien als Doppelschicht verwendet, erreichen sie gegenüber keinem Strahlenschutz eine Dosisreduktion von 90% (im Mittel von 120 μ Sv auf 11 μ Sv) im Gegensatz zum normalen Schilddrüsenschutz, welcher eine Reduktion von 72,4% (im Mittel von 190 μ Sv auf 52 μ Sv) erreicht [16, 40, 41].

Frei hängendes Strahlenschutzsystem

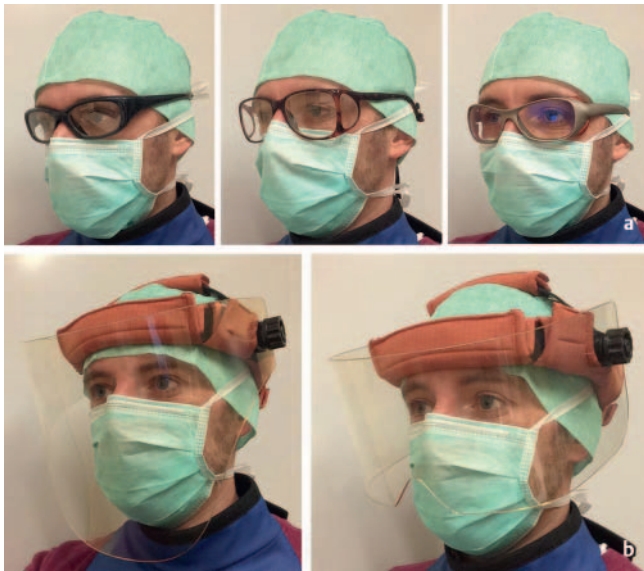
Ein weiteres kommerziell erhältliches System, welches das gesamte Gewicht selbst trägt, ist ein frei hängendes Strahlenschutzsystem mit einer integrierten Bleiglasscheibe für den Strahlenschutz des Kopf-Hals-Bereichs (► **Abb. 3**). In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass dieses System, vor allem im Kopf-Hals-Bereich, einen mehrfach besseren Strahlenschutz gewährleistet als die Verwendung konventioneller Systeme [42, 43]. Savage et al. berichten hier exemplarisch von einer 94%igen Reduktion (von 2,4 μ Sv/min auf 0,14 μ Sv/min) der Ortsdosis für den Kopf-Hals-Bereich im Vergleich zum konventionellen Strahlenschutzsystem inklusive der mobilen Bleiglasscheibe und dem Untertischschutz [44].

Bleiglas-Brillen und -Visiere

Um vor allem den Nachteil des konventionellen Strahlenschutzes im Kopf-Hals-Bereich auszugleichen, wurden mehrere Systeme, wie Bleiglas-Brillen, Schutzvisiere oder Kopfschutz entwickelt. Vor allem die Entwicklung der Bleiglas-Brillen, nicht zuletzt aufgrund des neuen Grenzwertes der Augenlinse von 20 mSv pro Jahr, hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Das Tragen der Bleiglas-Brillen wird jedoch derzeit kontrovers diskutiert, was die Studie von Lynskey et al. widerspiegelt, in der nur 54,2% der befragten Radiologen angeben, eine Bleiglas-Brille während einer Intervention zu tragen [33]. In Phantomexperimenten konnte gezeigt werden, dass bei günstiger Röntgenröhren-Angulation und Position des Kopfes eine Reduktion der Ortsdosis der Augenlinse von 66,7% bis 96,0% (exemplarisch von 0,32 mSv/h auf 0,04 mSv/h [18]) erreicht werden kann [17, 19]. Diese Reduktion ist jedoch nicht für beide Augen gleich. Fetterly et al. zeigten in ihrer Studie, dass bei einem experimentellen Versuchsaufbau einer angiografischen Untersuchung das von der Streustrahlung abgewandte Auge gar nicht geschützt wird [45]. Die Hauptgründe für diese Ergebnisse liegen in der Orientierung des Kopfes des Untersuchers in Bezug zur Streustrahlenquelle und in der Passform der Brillen [17]. Van Rooijen und Merce et al. konnten in ihren klinischen Studien zeigen, dass sich eine Strahlenreduktion von 50% beim Tragen einer Bleiglas-Brille bzw. in Kombination mit der mobilen Bleiglasscheibe von 82,5%, für die Augenlinse ergibt [22, 46]. Hierbei zeigt sich, dass Bleigleichwerte der Brille von 0,35 mm, 0,5 mm und größer keine signifikante zusätzliche Strahlenschutzwirkung haben. Bei leichten Modellen mit einem Bleigleichwert von 0,07 mm ist die Strahlentransparenz, also die Durchlässigkeit von Röntgenstrahlung, um das 3-fache im Verhältnis zu Brillen mit einem Bleigleichwert von 0,75 mm erhöht [16]. Weiterhin gibt es unterschiedliche Modelle, von der normalen Brillenform über zusätzliche seitliche Abschirmungen bis hin zu Visieren (► **Abb. 5**). Hier konnte gezeigt werden, dass eine Vergrößerung der Brillengläser keinen Effekt auf den Strahlenschutz hat. Lediglich die zusätzliche seitliche Abschirmung kann einen zusätzlichen Strahlenschutz bewirken, da die Streustrahlen zumeist von seitlich unten kommen. Galster et al. konnten zeigen, dass Brillen und Visiere eine Reduktion der Linsendosis um etwa 85–90% erreichen [17], obwohl Visiere lediglich einen Bleigleichwert von 0,1 mm, im Gegensatz zu 0,5 mm oder sogar 0,75 mm der Brillen, haben. Dieses ist darauf begründet, dass Visiere eine größere Fläche besitzen und somit die Streustrahlung im Kopf des Personals durch eine bessere Abschirmung reduzieren (► **Abb. 5**). Weiterhin haben besonders Strahlenschutzvisiere den Vorteil, dass sie ebenfalls als Spritzschutz, besonders bei infektiösen Patienten, dienen.

Strahlenschutzhaube

Aktuelle Kohortenstudien zeigen eine Inzidenz für eine vermehrte kraniale Tumorbildung bei langjähriger Strahlenexposition [12]. Daher steht der Strahlenschutz des Kopfes erneut wieder stark im Fokus und ist ein aktuelles Forschungsgebiet (► **Abb. 2**). Die Äquivalentdosis direkt unterhalb einer Strahlenschutzkappe kann im Mittel um 85,4% (Mittelwerte: von 224 μ Sv auf 48 μ Sv) gesenkt werden [40]. Dieses sollte auch die Organdosis der Augenlinse



► **Abb. 5** a Verschiedene Modelle einer Bleiglas-Brille. b Verschiedene Modelle eines Bleiglas-Visiers.

senken, da etwa 21 % der Strahlenexposition der Augenlinse aus Streustrahlung des Untersuchers selbst stammen [16]. Andere Studien konnten keine oder nur eine geringe Reduktion der Äquivalentdosis von 3,3 % des Neurokraniums verzeichnen [45, 46]. Diese Messungen beziehen sich hauptsächlich auf die Hirnoberfläche, daher ist hier sowohl Entwicklungs- als auch Forschungsbedarf.

Strahlenschutzhandschuhe

Der Dosisgrenzwert der Hände beträgt 500 mSv pro Jahr (Richtlinie 2013/59/Euratom). Da die Hände ungeschützt und so der Streustrahlung direkt ausgesetzt sind, ist die Strahlenexposition hier sehr hoch [47]. Zudem besteht hier die Gefahr, mit den Händen in den Primärstrahl zu kommen. Neeman et al. konnten zeigen, dass bei der Verwendung von bleifreien Strahlenschutzhandschuhen eine Reduktion der Energiedosis bei CT-gesteuerten Therapien von 97,1 % (im Mittel von 1792 μ Gy auf 52 μ Gy) erreicht werden kann [28]. Befindet sich jedoch der Strahlenschutz im Primärstrahl, kommt es aufgrund der Durchleuchtungsautomatik zu einer Erhöhung der Röntgenröhrenenergie und damit zu einer Erhöhung der Strahlenexposition. Daher ist der Strahlenschutz der Hände in seiner Anwendung besonders schwierig. Eine aktuelle Phantomstudie konnte zeigen, dass bei der Verwendung von Strahlenschutzhandschuhen, bestehend aus Kautschuk und Metalloxiden (z. B. Bismuth), mit nahezu unveränderter Tragequalität zu herkömmlichen Handschuhen, eine Reduktion der Äquivalentdosis von 42,6 % erreicht werden kann. Werden diese Handschuhe jedoch im Primärstrahl verwendet, kommt es zu einer Erhöhung der Äquivalentdosis der Hand von 64,5 % [48]. Um dieser Gefahr zu entgehen, werden regelhaft entsprechende Hilfsmittel, wie zum Beispiel Nadelhalter, genutzt. Je länger der Nadelhalter ist, desto besser sind die Hände geschützt, jedoch nimmt die Kontrolle über die Nadel mit deren Länge ab [49, 50].



► **Abb. 6** a Filmdosimeter mit unterschiedlichen Abschirmungen zur Dosisbestimmung (v.l.n.r.: Röntgenfilm, Kassettenboden mit Kupfer und Bleiabschirmungen, Kassettendeckel mit Kupfer und Bleiabschirmungen). b BeOSL-Dosimeter. c Elektronisches Personendosimeter (EPD).

Personendosimetrie

Dosimetrie und Überwachung des medizinischen Personals

Zum einen soll mit der Dosimetrie das Bewusstsein für die eigene Strahlenexposition geweckt werden und zum anderen gibt es, wie schon oben erwähnt, für verschiedene Organe bzw. Körperregionen unterschiedliche Dosisgrenzwerte, die gemessen und von der Behörde dokumentiert werden. Das neue Strahlenschutzgesetz sieht für Personen, die mit ionisierender Strahlung umgehen, eine persönliche Kennnummer für das Strahlenschutzregister vor, um auch bei einem Arbeitsplatz- oder Namenswechsel eine lückenlose Dokumentation sicherzustellen [51]. Um diese Grenzwerte zu messen bzw. zu überwachen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine der am weitesten verbreiteten und schon in den 1960er Jahren verwendeten Systeme ist das Filmdosimeter. 1962 wurde von der International Atomic Energy Agency ein Schreiben für die Benutzung eines Filmdosimeters für das persönliche Monitoring veröffentlicht. Das Funktionsprinzip ist bis heute weiterhin unverändert und wird in ► **Abb. 6a** verdeutlicht [52]. Diese Dosimeter sind kostengünstig, zeigen ein hohes Ansprechverhalten und können ohne Schwierigkeiten täglich getragen werden. Der Nachteil dieses Systems ist die niedrige Messgenauigkeit bei niedrigen Energien und dass die Dosiswerte monatlich ermittelt werden und somit kein Rückschluss auf die Ursache einer erhöh-

ten Strahlenbelastung möglich ist. Ein alternatives, etwa seit 10 Jahren erhältliches Dosimeter arbeitet mit lumineszierenden Kristallen (optically stimulated luminescence aus Berylliumoxid, BeOSL), welche durch optische Anregung ausgelesen werden können und ansonsten der Handhabung eines Filmdosimeters entsprechen (► **Abb. 6b**). Es konnte gezeigt werden, dass diese Dosimeter ein niedriges Ansprechverhalten bei Energien zwischen 60 und 100 keV haben, welches jedoch durch entsprechende Konstruktion und Verwendung eines linearen Algorithmus zur Auswertung ausgeglichen werden kann. Weiterhin sind auch diese Dosimeter kostengünstig, was unter anderem damit zu tun hat, dass sie mehrfach ausgelesen werden können. Somit eignen sich diese Dosimeter ebenfalls für die tägliche Routine [53, 54].

Elektronisches Personendosimeter (EPD)

Um die aktuelle Strahlenexposition zu überwachen, gibt es sogenannte elektronische Personendosimeter (EPD), welche eine augenblickliche Strahlenexposition anzeigen können und optional eine akustische oder optische Warnung ausgeben. ► **Abb. 6c** zeigt hier exemplarisch ein elektronisches Personendosimeter. Hierfür werden zumeist Halbleitermaterialien, welche eine gute Sensitivität im Bereich zwischen 70 und 110 keV zeigen, verwendet [55]. Clairand et al. haben in einer Studie 5 EPDs miteinander verglichen und konnten zeigen, dass diese sowohl bei niedrigen Energien, als auch bei gepulsten Untersuchungen korrekte Werte anzeigen. 4 der 5 untersuchten Dosimeter konnten sogar die Ortsdosis eines einzelnen Pulses messen [56]. Neue Systeme bestehen aus Überwachungseinheiten, welche die Dosiswerte von bis zu 5 Dosimetern gleichzeitig anzeigen können. Somit kann das gesamte medizinische Personal während einer Untersuchung mit einer zentralen Monitoring-Einheit überwacht werden. Der Vorteil dieses Systems ist, dass jedes Mitglied im Untersuchungsraum in Echtzeit gemessen wird und bei einer erhöhten Strahlenexposition sofort gehandelt werden kann [57, 58]. Sailer et al. konnten dazu in einer aktuellen Studie zeigen, dass hier nicht nur das Sicherheitsgefühl des medizinischen Personals erhöht wird, sondern dies beim technischen Personal sogar zu einer signifikanten Reduktion der Personendosis (von $0,12 \mu\text{Sv}/\text{Gy}/\text{cm}^2$ auf $0,08 \mu\text{Sv}/\text{Gy}/\text{cm}^2$) geführt hat [59].

Position des Dosimeters

Abgesehen von der Auswahl eines geeigneten Dosimeters spielt vor allem die Positionierung und die Verwendung eine entscheidende Rolle. Rigatelli et al. konnten zeigen, dass Radiologen mit einer Körpergröße $< 165 \text{ cm}$ höhere Dosiswerte auf ihren Dosimetern haben, als Radiologen mit einer Körpergröße von $> 165 \text{ cm}$, vorausgesetzt, das Dosimeter wird an der gleichen Körperregion getragen. Dieses ist durch die Verteilung der Streustrahlung erklärt. Daher ist es wichtig, dass Dosimeter immer an der gleichen repräsentativen Position, z. B. an der Brusttasche, getragen werden [60]. Wie in ► **Tab. 1** dargestellt, gibt es verschiedene Dosisgrenzwerte für unterschiedliche Organe bzw. Körperregionen. Da nicht alle Körperregionen einzeln gemessen werden können, kann die Dosis für diese mithilfe von Referenzmessungen abgeschätzt werden. Fetterly et al. verwenden in ihrer Studie ein Dosimeter links am Kragen und erhalten von Referenzmessungen

die Äquivalentdosisexposition für das ganze Gehirn von 8,4 %, für die linke Karotis von 72 %, für die rechte Karotis von 28 %, für die linke Augenlinse von 25 % und für die rechte Augenlinse von 9,2 % des gemessenen Gesamtdosiswerts [45]. Neto et al. empfehlen weiterhin die Verwendung von 2 Dosimetern, eines unterhalb der Bleischürze und eines darüber, um mit diesem die richtige Körperdosis zu bestimmen [61]. Sollen bei bestimmten Anwendungen doch einzelne Körperregionen gemessen bzw. überwacht werden, so können spezielle Dosimeter, wie das Ringdosimeter für den Finger, welches meist in der Nuklearmedizin verwendet wird, benutzt werden.

Zusammenfassung und aktuelle Trends

Ein optimaler Strahlenschutz sieht immer eine Kombination aus unterschiedlichen Strahlenschutzmitteln bzw. Methoden vor. Adamus et al. zeigen in ihrer Studie für die mittlere Äquivalentdosis der Augenlinsen exemplarisch für die Anlage eines TIPPS (transjugulären intrahepatischen portosystemischen Shunt) eine sukzessive Dosisreduktion mit zusätzlicher Verwendung von Strahlenschutzmitteln. Wird nur ein Untertischschutz verwendet, wird eine mittlere Augenlinsendosis von 466 mSv erreicht. Dieser Wert sinkt auf 55 mSv, wenn zusätzlich ein seitlicher Patientenaufsatz (nach oben verlängerbarer Untertischschutz) und eine mobile Bleiglasscheibe verwendet werden. Eine weitere Reduktion der Augenlinsendosis auf 9,5 mSv kann durch die Verwendung einer Bleiglas-Brille erzielt werden [62].

Die Verwendung einer Strahlenschutzschürze, welche laut dem aktuellen DIN-Ausschuss Radiologie (aufgrund der IEC 61331-3:2014-05, Unterpunkt 5.4) mindestens 60 % des Körperumfangs bedecken soll, und eines Schilddrüsenschutzes sowie die am Patiententisch bzw. an der Decke montierten Strahlenschutzsysteme sind obligat. Auch der Strahlenschutz des Kopfhals-Bereichs, vor allem der Augenlinse, sollte an Wichtigkeit gewinnen. Es gibt jedoch weiterhin Entwicklungsbedarf, vor allem im Hinblick auf die Augenlinsendosis und deren Monitoring. Hier werden neue Bleiglas-Brillen mit integrierten Dosimetern erwartet, damit zukünftig die genaue Äquivalentdosis bestimmt und somit das Kataraktisiko reduziert werden kann. Allgemein spielt die Dosimetrie eine wichtige Rolle und sollte, wenn möglich zusätzlich zu dem vorgeschriebenen monatlich ausgelesenen Dosimeter, um ein EPD ergänzt werden, um Dosiswerte direkt erkennen und Handlungsabläufe optimieren zu können. Dieser große Vorteil konnte in einer aktuellen Studie gezeigt werden. Es konnte nicht nur das Sicherheitsgefühl des medizinischen Personals erhöht, sondern auch die Strahlenexposition des technischen Personals signifikant reduziert werden.

Somit wird die richtige Kombination aus Strahlenschutzmitteln und entsprechender Dosimetrie die Sicherheit beim Umgang mit Röntgenstrahlung erhöhen.

Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Fritz-Niggli H. Forschung mit Röntgenstrahlen, Bilanz eines Jahrhunderts; Strahlenbiologie – Von den Anfängen zur heutigen Forschung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag; 1995: 299–315
- [2] Gohrbandt E, Gebka J, Berndorfer A. Handbuch der plastischen Chirurgie. Band 1 Walter de Gruyter; 1972: 17
- [3] Unna PG. Die chronische Röntgendermatitis der Radiologen. Fortschr Röntgenstr 1904–1905; 8: 67–91
- [4] Levy-Dorn M. Vorrichtungen zum Schutz des Untersuchers gegen die Röntgenstrahlen. Münch Med Wschr 1898; 8: 577
- [5] Levy-Dorn M. Neues aus der Röntgentechnik Verhandl. Dtsch Röntgen-Ge 1905; 1: 149–153
- [6] Geyer PS. Strahlenschutz und Strahlenschäden beim Umgang mit Röntgenstrahlen in der Veterinärstrahlenkunde; Eine Untersuchung der deutsch- und englischsprachigen Literatur unter Berücksichtigung der aktuellen Röntgenverordnung. Dissertation Freie Universität Berlin. 2003. Journal Nr. 2704
- [7] Bhargavan M. Trends in the utilization of medical procedures that use ionizing radiation. Health Physics 2008; 95: 612–627
- [8] Mettler FA, Bhargavan M, Faulkner K et al. Radiologic and Nuclear Medicine Studies in the United States and Worldwide: Frequency, Radiation Dose, and Comparison with Other Radiation Sources 1950–2007. Radiology 2009; 253: 520–531
- [9] Kloeckner R, Santos DP, Schneider J et al. Radiation exposure in CT-guided interventions. European Journal of Radiology 2013; 82: 2253–2257
- [10] Kitahara CM, Linet MS, Balter S et al. Occupational Radiation Exposure and Deaths From Malignant Intracranial Neoplasms of the Brain and CNS in U.S. Radiologic Technologists, 1983–2012. Am J Roentgenol 2017; 208: 1–7
- [11] Linet MS, Hauptmann M, Freedman DM et al. Interventional radiography and mortality risks in U.S. radiologic technologists. Pediatr Radiol 2006; 36: 113–120
- [12] Rajaraman P, Doody MM, Yu CL et al. Cancer Risks in U.S. Radiologic Technologists Working With Fluoroscopically Guided Interventional Procedures, 1994–2008. Am J Roentgenol 2016; 206: 1101–1110
- [13] Seals KF, Lee EW, Cagnon CH et al. Radiation-Induced Cataractogenesis: A Critical Literature Review for the Interventional Radiologist. Cardiovasc Intervent Radiol 2016; 39: 151–160
- [14] Vano E, Gonzalez L, Beneytez F et al. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimized interventional radiology laboratories. The British Journal of Radiology 1998; 71: 728–733
- [15] Luchs JS, Rosioreanu A, Gregorius D et al. Radiation Safety during Spine Interventions. J Vasc Interv Radiol 2005; 16: 107–111
- [16] Meisinger QC, Stahl CM, Andre MP et al. Radiation Protection for the Fluoroscopy Operator and Staff. Am J Roentgenol 2016; 207: 745–754
- [17] Galster M, Guhl C, Uder M et al. Exposition der Augenlinse des Untersuchers und Effizienz der Strahlenschutzmittel bei fluoroskopischen Interventionen. Fortschr Röntgenstr 2013; 185: 474–481
- [18] Thornton RH, Dauer LT, Altamirano JP et al. Comparing Strategies for Operator Eye Protection in the Interventional Radiology Suite. J Vasc Interv Radiol 2010; 21: 1703–1707
- [19] Hu P, Kong Y, Chen B et al. Shielding effect of lead glasses in radiologists eye lens exposure in interventional procedures. Radiation Protection Dosimetry 2017; 174: 136–140
- [20] Vanhavere F, Carinou E, Domienik J et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project. Radiation Measurements 2011; 46: 1243–1247
- [21] Martin CJ. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring. Radiat Prot Dosimetry 2016; 169: 286–291
- [22] Van Rooijen BD, De Haan MW, Das M et al. Efficacy of Radiation Safety Glasses in Interventional Radiology. Cardiovasc Intervent Radiol 2014; 37: 1149–1155
- [23] Maeder M, Brunner-La Rocca HP, Wolber T et al. Impact of a Lead Glass Screen on Scatter Radiation to Eyes and Hands in Interventional Cardiology. Catheterization and Cardiovascular Interventions 2006; 67: 18–23
- [24] Gilligan P, Lynch J, Eder H et al. Assessment of Clinical Occupational Dose Reduction Effect of a New Interventional Cardiology Shield for Radial Access Combined With a Scatter Reducing Drape. Catheterization and Cardiovascular Interventions 2015; 86: 935–940
- [25] Schueler A, Vrieze TJ, Bjarnason H et al. An Investigation of Operator Exposure in Interventional Radiology. RadioGraphics 2006; 26: 1533–1541
- [26] Shortt CP, Al-Hashimi H, Malone L et al. Staff Radiation Doses to the Lower Extremities in Interventional Radiology. Cardiovasc Intervent Radiol 2007; 30: 1206–1209
- [27] Mahnken AH, Sedlmair M, Ritter C et al. Efficacy of Lower-Body Shielding in Computed Tomography Fluoroscopy-Guided Interventions. Cardiovasc Intervent Radiol 2012; 35: 1475–1479
- [28] Neeman Z, Dromi SA, Sarin S et al. CT Fluoroscopy Shielding: Decreases in Scattered Radiation for the Patient and Operator. J Vasc Interv Radiol 2006; 17: 1999–2004
- [29] Hapt F, Kirsch M, Hosten N. Evaluation einer Strahlenschutzwand als Dauerschutzeinrichtung zur Dosisreduktion des Arztes bei Interventionen unter CT-Durchleuchtung. Fortschr Röntgenstr 2010; 182: 512–517
- [30] King JN, Champlin AM, Kelsey CA et al. Using a Sterile Disposable Protective Surgical Drape for Reduction of Radiation Exposure to Interventionalists. Am J Roentgenol 2002; 178: 153–157
- [31] Dromi S, Wood BJ, Oberoi J et al. Heavy Metal Pad Shielding during Fluoroscopic Interventions. J Vasc Interv Radiol 2006; 17: 1201–1206
- [32] Lange HW, von Boetticher H. Reduction of Operator Radiation Dose by a Pelvic Lead Shield During Cardiac Catheterization by Radial Access. JACC 2012; 5: 445–449
- [33] Lynskey GE, Powell DK, Dixon RG et al. Radiation Protection in Interventional Radiology. J Vasc Interv Radiol 2013; 24: 1547–1551
- [34] Toossi MTB, Zare H, Bayani SH et al. Evaluation of the Effectiveness of the Lead Aprons and Thyroid Shields Worn by Cardiologists in Angiography Departments of Two Main General Hospitals in Mashhad, Iran. Journal of Nuclear Science and Technology 2008; 5: 159–162
- [35] Andreassi MG, Piccaluga E, Guagliumi G et al. Occupational Health Risks in Cardiac Catheterization Laboratory Workers. Circ Cardiovasc Interv 2016; 9: 1–8
- [36] Klein LW, Tra Y, Garratt KN et al. Occupational Health Hazards of Interventional Cardiologists in the Current Decade. Catheterization and Cardiovascular Interventions 2015; 86: 913–924
- [37] Goldsein JA, Balter S, Cowley M et al. Occupational Hazards of Interventional Cardiologists: Prevalence of Orthopedic Health Problems in Contemporary Practice. Catheterization and Cardiovascular Interventions 2004; 63: 407–411
- [38] Kazempour M, Saeedimoghadam M, Shekoohi Shooli F et al. Assessment of the Radiation Attenuation Properties of Several Lead Free Composites by Monte Carlo Simulation. J Biomed Phys Eng 2015; 5: 67–76
- [39] McCaffrey JP, Tessier F, Shen H. Radiation shielding materials and radiation scatter effects for interventional radiology (IR) physicians. Med Phys 2012; 39: 4537–4546

- [40] Uthoff H, Pena C, West J et al. Evaluation of Novel Disposable, Light-Weight Radiation Protection Devices in an Interventional Radiology Setting: A Randomized Controlled Trial. *Am J Roentgenol* 2013; 200: 915–920
- [41] Uthoff H, Benenati MJ, Katzen BT et al. Lightweight Bilayer Barium Sulfate-Bismuth Oxide Composite Thyroid Collars for Superior Radiation Protection in Fluoroscopy-guided Interventions: A Prospective Randomized Controlled Trial. *Radiology* 2014; 270: 601–606
- [42] Marichal DA, Anwar T, Kirsch D et al. Comparison of a Suspended Radiation Protection System versus Standard Lead Apron for Radiation Exposure of a Simulated Interventionalist. *J Vasc Interv Radiol* 2011; 22: 437–442
- [43] Hausen DC, Van Der Bom IMJ, Nogueira RG. A prospective case control comparison of the ZeroGravity system versus a standard lead apron as radiation protection strategy in neuroendovascular procedures. *J NeuroIntervent Surg* 2016; 8: 1052–1055
- [44] Savage C, Seale TM, Shaw CJ et al. Evaluation of a Suspended Personal Radiation Protection System vs. Conventional Apron and Shields in Clinical Interventional Procedures. *Open Journal of radiology* 2013; 3: 143–151
- [45] Fetterly K, Schueler B, Grams M et al. Head and Neck Radiation Dose and Radiation Safety for Interventional Physicians. *Cardiovascular interventions* 2016; 10: 520–528
- [46] Merce MS, Korchi AM, Kobzeva L et al. The value of protective head cap and glasses in neurointerventional radiology. *J NeuroIntervent Surg* 2016; 8: 736–740
- [47] Sakamoto H, Ikegawa H, Kobayashi H et al. A study of operator's hand and finger exposure dose reduction during angiographic procedures. *Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi* 2009; 65: 25–34
- [48] Kamusella P, Scheer F, Lüdke CW et al. Interventional Angiography: Radiation Protection for the Examiner by using Lead-free Gloves. *Journal of Clinical and Diagnostic Research* 2017; 11: 26–29
- [49] Stoeckelhuber BM, Leibecke T, Schulz E et al. Radiation Dose to the Radiologist's Hand During Continuous CT Fluoroscopy-Guided Interventions. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2005; 28: 589–594
- [50] Sarmiento S, Pereira JS, Sousa MJ et al. The use of needle holders in CTF guided biopsies as a dose reduction tool. *J Appl Clin Med Phys* 2018; 19: 250–258
- [51] Wigge P. Das neue Strahlenschutzgesetz – Überblick über die Auswirkungen auf das Fachgebiet der Radiologie. *Fortschr Röntgenstr* 2017; 189: 1010–1014
- [52] The Use of Film Badges for Personal Monitoring. Vienna: International Atomic Energy Agency. 1962. (Safety Series No. 8)
- [53] Jahn A, Sommer M, Henniger J. Environmental Dosimetry with the BeOSL Personal Dosimeter. *Radiation Protection Dosimetry* 2016; 170: 346–349
- [54] Haninger T, Hödlmoser H, Figel M et al. Properties of the BeOSL Dosimetry system in the framework of a large-scale personal monitoring service. *Radiation Protection Dosimetry* 2016; 170: 269–273
- [55] Terasaki K, Fujibuchi T, Murazaki H et al. Evaluation of basic characteristics of a semiconductor detector for personal radiation dose monitoring. *Radiol Phys Technol* 2017; 10: 189–194
- [56] Clairand I, Struelens L, Bordy JM et al. Intercomparison of active personal dosimeters in interventional radiology. *Radiation Protection Dosimetry* 2008; 129: 340–345
- [57] Cardoso J, Santos JAM, Santos L et al. Characterization of an active dosimeter according to IEC 61526:2010. *Radiation Protection Dosimetry* 2016; 170: 127–131
- [58] Mangiarotti M, D'Ercole L, Quaretti P et al. evaluation of an active personal dosimetry system in interventional radiology and neuroradiology: preliminary results. *Radiation Protection Dosimetry* 2016; 172: 483–487
- [59] Sailer AM, Vergoossen L, Paulis L et al. Personalized Feedback on Staff Dose in Fluoroscopy-Guided Interventions: A New Era in Radiation Dose Monitoring. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2017; 40: 1756–1762
- [60] Rigatelli G, Panin S, Fiorrevanti R et al. Impact of Operators' Height on Individual Radiation Exposure Measurements During Catheter-Based Cardiovascular Interventions. *Journal of Interventional Cardiology* 2016; 29: 83–88
- [61] Neto FAB, Alves AFF, Mascarenhas YM et al. Efficiency of personal dosimetry methods in vascular interventional radiology. *Physica Medica* 2017; 37: 58–67
- [62] Adamus R, Loose R, Wucherer M et al. Strahlenschutz in der interventionellen Radiologie. *Radiologie* 2016; 56: 275–281