

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Interventionelle Radiologie

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 217. Sitzung der Strahlenschutzkommission
am 20./21. September 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Strahlenbiologische Aspekte in der interventionellen Radiologie	7
2.1	Patientenexposition und Konsequenzen	7
2.1.1	Effekte und Schwellenwerte.....	7
2.1.2	Untersuchungsfrequenzen	10
2.2	Personalexposition und Konsequenzen	11
3	Strahlenexposition	13
3.1	Patient.....	13
3.1.1	Kardiologie	13
3.1.2	Besonderheiten der Kinderkardiologie.....	16
3.1.3	Allgemeine interventionelle Radiologie.....	17
3.1.4	Neurointerventionen	23
3.1.5	Vertebroplastie.....	26
3.2	Personal.....	27
4	Maßnahmen zur Dosisreduzierung	29
4.1	Organisatorische Empfehlungen.....	29
4.1.1	Qualifikation.....	29
4.1.2	Dosisreferenzwerte	30
4.2	Technische Anforderungen	30
4.2.1	Allgemein	33
4.2.2	Durchleuchtung	34
4.2.3	Aufnahme	35
4.3	Strahlenschutz des Personals	36
4.3.1	Besonderheiten der Kardiologie.....	37
5	Empfehlungen	38
6	Abkürzungsverzeichnis	41
7	Literaturverzeichnis	42

1 Einleitung

Die „Interventionelle Radiologie“, den Begriff prägte 1971 Margulis (s. [Katzen 1993]), hatte in den vergangenen Jahren erstaunliche Erfolge zu verzeichnen.

„Interventionelle Radiologie beinhaltet medizinische Eingriffe an Kranken, an denen entweder pathologische Veränderungen, die zu Symptomen führen, beseitigt oder gelindert werden oder das Fortschreiten der Krankheit beendet bzw. verlangsamt wird. Dies geschieht durch einen perkutanen Zugang, ohne eine Körperhöhle zu öffnen, meist in Lokalanästhesie. Im Rahmen dieser Interventionen werden Röntgenstrahlen eingesetzt, um die Maßnahme sichtbar zu machen und das Ergebnis zu kontrollieren.“ [WHO 1995].

Da interventionell tätige Ärzte in der Regel nicht primäre Ansprechpartner für Patienten sind, empfiehlt es sich, dass bereits die Überweiser Kenntnisse im sinnvollen Einsatz interventioneller radiologischer Verfahren und alternativer Behandlungsverfahren besitzen. Aus diesem Grunde wurden gemäß den Vorgaben der EU-Richtlinie 97/43/EURATOM [EU 1997] von den Mitgliedsstaaten Überweisungskriterien für bildgebende Verfahren erstellt. Die Überweisungskriterien für Deutschland wurden nach Abstimmung mit den medizinisch-wissenschaftlichen Fachgesellschaften in der 201. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 23.09.2005 verabschiedet. Sie sind als „**Orientierungshilfe für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen**“ veröffentlicht [SSK 2006], im Internet als interaktive Webseite, als interaktive PDA-Version und als PDF-Datei zum Download verfügbar (www.ssk.de) sowie über die SSK-Geschäftsstelle als CD-ROM mit allen genannten Varianten erhältlich. In der deutschen Orientierungshilfe sind erstmals, im Unterschied zu früheren Versionen anderer EU-Mitgliedsstaaten, auch interventionelle Verfahren enthalten.

Zu den interventionellen Maßnahmen gehören:

- die Wiedereröffnung von Koronararterien (Perkutane Transluminale Coronar-Angioplastie = PTCA, Lyse),
- die Wiedereröffnung von zentralen und peripheren Gefäßen (z.B. perkutane transluminale Angioplastie = PTA, Aspiration, Fragmentation, Lyse),
- die Implantation von Gefäßprothesen (verschiedene Formen von Stents),
- die Implantation von Katheter- oder Port-Systemen (z.B. Port zur Chemotherapie oder parenteralen Ernährung),
- der Verschluss von Gefäßen mit verschiedenen Verfahren (z.B. Embolisation),

- die Erzeugung und Behandlung neuer künstlicher Gefäßverbindungen (z.B. TIPS-Shunt der Leber, Hämodialyse-Shunt),
- die perkutane Ableitung von Flüssigkeiten (z.B. Erguss, Abszess),
- die Behandlung von Gangsystemen des Gastrointestinaltrakts, der Gallenwege und des Urogenitalsystems,
- die Hochfrequenzablation rhythmogener Foci oder Reizleitungsstrukturen,
- sonstige spezielle Interventionen wie z.B. Valvuloplastien,
- das Heranführen therapeutischer Substanzen mit Kathetern unmittelbar an einen Krankheitsherd (z.B. Chemoembolisation).

Der Erfolg der interventionellen Radiologie erklärt sich aus der im Vergleich zu operativen Eingriffen geringeren Invasivität und dem damit geringeren Morbiditäts- und Mortalitätsrisiko.

Zum Teil werden neue Therapieoptionen bei Patienten, die z.B. für eine Operation nicht in Frage kommen, erst durch die interventionelle Radiologie möglich. Beispiele sind Stentbehandlung und Lyse in den Koronararterien, die Ablation von Raumforderungen der Leber mittels Hochfrequenz- oder Laser-Sonden oder die Therapie von cerebralen Aneurysmen und vaskulären Malformationen.

Eine wichtige Maßnahme zur Reduktion der Strahlenexposition von Patienten und Personal ist die regelmäßige Schulung. Verschiedene nationale und internationale Gremien haben hierzu Material zur Verfügung gestellt. So existieren zum Beispiel von der IAEA mehrere Trainings-CD's für interventionell tätige Radiologen und Kardiologen [IAEA 2005]. Von der Europäischen Union wurde in fünf Sprachen (englisch, deutsch, französisch, italienisch und spanisch) eine Trainings-CD erstellt (MARTIR = Multimedia and Audiovisual Radiationprotection Training in Interventional Radiology), die sich auf verschiedenen Anforderungsniveaus an Radiologen, Medizinphysiker und Hilfspersonal richtet. Die jeweiligen Trainings-Kurse können zur Selbstevaluierung mit einer Multiple-Choice-Prüfung abgeschlossen werden [MARTIR 2002; Hirshfeld et al. 2004]. Ungeachtet dieser Aktivitäten kann auf ein regelmäßiges Training in allen Belangen des Strahlenschutzes vor Ort mit allen beteiligten Personen nicht verzichtet werden.

Im Unterschied zur „Orientierungshilfe für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen“, die sich an überweisende Ärzte richtet, soll diese Stellungnahme der SSK interventionell tätigen Radiologen, Kardiologen und sonstigen Ärzten einen aktualisierten Überblick zu den Themen stochastische und de-

terministische Strahlenwirkung, Strahlenexposition von Patienten und Personal, optimierte Untersuchungsverfahren und neue technische Entwicklungen geben.

2 Strahlenbiologische Aspekte in der interventionellen Radiologie

2.1 Patientenexposition und Konsequenzen

2.1.1 Effekte und Schwellenwerte

Als Folge der hohen Exposition wurden in Einzelfällen bei interventionellen Maßnahmen frühe Strahlenreaktionen an der Haut untersuchter Patienten beobachtet. So berichten die Dermatologen Wolff und Heinrich [Wolff und Heinrich 1993] bei zwei ihrer Patienten von Strahlenschäden der Haut.



Abb. 1: Radiodermatitis in der Folge komplexer kardiologischer Interventionen

Die Fachpresse [Ärztezeitung 1993, 1995] hat diese Fälle aufgegriffen und auf hohe Strahlendosen bei der interventionellen Kardiologie hingewiesen. In Amerika haben sowohl wissenschaftliche Gesellschaften [SCIR 1994, Wagner et al. 1994] als auch die Food and Drug Administration (FDA) [FDA 1992, 1994] auf die prinzipielle Möglichkeit von Strahlenschäden bei interventionellen Maßnahmen hingewiesen. Dabei werden vor allem die in Tab. 1 aufgeführten deterministischen Effekte an der Haut und die aufgeführten Schwellendosen diskutiert.

In Tab. 1 sind auch die Durchleuchtungszeiten zur Erreichung der angegebenen Schwellendosen aufgeführt. Die International Commission on Radiological Protection (ICRP) [ICRP 1990] und das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) [UNSCEAR 1993] geben für die feuchte Desquamation eine Schwellendosis von 20 Gy an, wobei diese Hautveränderungen nach etwa 4 Wochen auftreten. Eine dermale Nekrose wird durch eine Dosis von 50 Gy oder mehr induziert und tritt nach ca. 10 Wochen auf.

Tab. 1: Strahlenbedingte Hautreaktionen (nach [SSK 2007]), bezogen auf die Dosisleistung von 0,02 Gy/min (Normal-Mode) bzw. 0,2 Gy/min (High-Level-Mode)

		<i>Durchleuchtungszeiten zur Erreichung der Schwellendosis (Minuten)</i>		
Effekt auf den Patienten	Typische Schwelle absorbierte Dosis (Gy)	Normal-Mode	High-Level-Mode	Latenzzeit
Erythem	3-5	150-250	15-25	Stunden bis Tage
Epilation				3 Wochen
temporär	3	150	15	
permanent	ca. 10	ca. 500	ca. 50	
Desquamation				
trocken	3-5	150-250	15-25	2-4 Wochen
feucht	10-20	500-1.000	50-100	4 Wochen
Ulzera	10-20	500-1.000	50-100	6 Wochen
Nekrose	> 50	2500	250	10 Wochen*
dermale Atrophie	> 10	500	50	> 10 Wochen*
Fibrose	> 10	500	50	> 6 Monate*
Teleangiektasie	> 10	500	50	> 12 Monate*

*Die Latenzzeit verhält sich zur Dosis invers proportional.

Mögliche weitere Effekte, deren Schwellenwerte der interventionell tätige Arzt kennen sollte, sind in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2: Weitere, in der interventionellen Radiologie mögliche deterministische Strahlenreaktionen (modifiziert nach [Wagner 1995])

Effekt auf den Patienten und den Untersucher	Einzeit-Dosis Schwellenwert (Gy)	Beginn
Katarakt	1-2*	> 1 Jahr
Thyreoiditis	≈ 10	Wochen
Funktionsstörung der Ohrspeicheldrüse	> 2	unmittelbar
Parotitis	≈ (2-10)	unmittelbar
Störung des Knochenwachstums	≈ 6	unmittelbar mit Wachstumsschub

*Dieser Wert wird z. Zt. diskutiert und könnte nach unten korrigiert werden.

– *Haut:*

Bis ca. 1960 waren Hautschäden in der konventionellen Röntgentherapie gut bekannt. Bei Zugrundelegung der Werte der Tab.1 dürfte in den beobachteten Fällen einer akuten Hautreaktion nach interventionellen radiologischen Maßnahmen eine Dosis von 2 Gy deutlich überschritten worden sein.

– *Augen:*

Die neuesten Untersuchungen zur strahleninduzierten Katarakt (Linsentrübung, grauer Star) stellen die ursprünglich von der ICRP [ICRP 1990] genannte Schwellendosis von 5 Gy für protrahierte bzw. fraktionierte Expositionen stark in Frage ([Worgul et al. 2007] und weitere in dieser Arbeit zitierte Publikationen). Die Untersuchungen in Tschernobyl, Hiroshima und Nagasaki sowie die an Personen nach CT-Untersuchungen, an Kindern mit Hämangiomen und an Astronauten legen für eine protrahierte/fraktionierte Exposition eine Schwellendosis (falls sie überhaupt existiert) von deutlich weniger als 1 Gy nahe. Damit stellt sich die Frage, ob der Grenzwert von 150 mSv im Kalenderjahr für das Auge einen ausreichenden Schutz darstellt. Die ICRP wird sich im Herbst 2007 mit dieser Frage intensiv beschäftigen.

– *Schilddrüse:*

Eine akute Thyreoiditis tritt erst nach recht hohen Dosen von etwa 10 Gy und mehr auf. Die letztgenannte Dosis ist bei radiologischen Interventionen in der Regel nicht zu erwarten.

– *Ohrspeicheldrüse:*

Eine strahlenbedingte Parotitis kann nach einer Exposition des Organs von mehr als 2 Gy auftreten. Dosen in dieser Größenordnung können allenfalls bei neuroradiologischen Interventionen auftreten.

– *Skelett:*

Besonderer Aufmerksamkeit bedürfen wegen der hohen Strahlenempfindlichkeit die Wachstumsfugen des Kindes. Die Schwellendosis wird heute bei etwa 6 Gy angenommen.

Die ICRP empfiehlt, Patienten über das mögliche Risiko deterministischer Strahlenwirkungen aufzuklären. Sind Hautdosen von jeweils > 3 Gy bei einmaligen Eingriffen oder jeweils > 1 Gy bei wiederholten Eingriffen zu erwarten, sollte eine schriftliche Einverständniserklärung vorliegen. Bei Hautdosen > 3 Gy sollten Patienten nach 10 bis 14 Tagen nachuntersucht werden.

Für das stochastische Risiko ist die Proportionalität (Linearität) der Induktion maligner Neoplasien oberhalb 100 mSv Ganzkörperdosis epidemiologisch nachgewiesen und wird für den Bereich darunter ebenfalls angenommen [ICRP 2007]. Das stochastische Risiko ist von zahlreichen Faktoren, insbesondere dem Alter des Patienten zum Zeitpunkt der Exposition, abhängig.

2.1.2 Untersuchungsfrequenzen

Die häufigsten interventionellen Maßnahmen werden in der Kardiologie erbracht (s. Tab. 3). Während invasive Koronardiagnostik und -therapie (PTCA) vorwiegend ältere Patienten betrifft, werden elektrophysiologische Eingriffe, u.a. Hochfrequenzablationen mit meist längeren Untersuchungs- und Durchleuchtungszeiten, häufiger bei jüngeren Patienten durchgeführt.

Tab. 3: *Auszüge des Untersuchungsaufkommens typischer Interventionen in der invasiven Kardiologie des Jahres 2003 in Deutschland [van Buuren et al. 2005]*

Diagnostik und Interventionen an den Koronararterien		Diagnostik und Interventionen: Sonstige	
Diagnostische Herzkatheter	652.781	Elektrophysiologische Diagnostik	32.231
Koronarinterventionen (PTCA)	221.867	Elektrophysiologische Ablationen	17.552
Intravaskulärer Ultraschall	3.295	Mitralvalvulotomien	364
Intrakoronarer Doppler	1.624	Septumreduktionen (HOCM)	497
Rotablation	655	Interventioneller Verschluss PFO	1.202
Lasertechnik	83	Interventioneller Verschluss ASD	431
Atherektomie	215		
Ultraschalltherapie	140		
Brachytherapie	2.177		
Embolieschutz	2.239		

2.2 Personalexposition und Konsequenzen

Interventionelle radiologische Maßnahmen sind stets mit Handlungen des Arztes und des Assistenzpersonals am oder mindestens in unmittelbarer Nähe des Patienten verbunden. Heute haben sich im Wesentlichen zwei Arbeitspositionen zur retrograden und antegraden Punktion am Patienten durchgesetzt.

Hauptarbeitsposition in der interventionellen Radiologie ist der transfemorale retrograde Zugang bei Interventionen im Bereich des Beckens, des Rumpfes oder der supraaortalen Gefäße sowie auch als Zugang zum gegenseitigen Bein in Cross-over-Technik.

Des weiteren kann der Zugangsweg transfemoral auch zur antegraden Punktion der gleichseitigen Extremität genutzt werden.

Der Untersucher steht hierbei jeweils in Höhe der Leiste des in Rückenlage positionierten Patienten, wobei das Bildverstärkersystem in Abhängigkeit von der zu behandelnden Region positioniert wird.

Der transradiale, transbrachiale und transaxilläre Zugang wird als besonderer Zugang genutzt, wenn ein transfemorales Zugehen erschwert oder nicht möglich ist. Bei diesen Zugängen ist die Strahlenexposition für den Untersucher, insbesondere bei Untersuchungen der oberen Körperhälfte mit Hilfe eines transbrachialen Zugangs, gegenüber dem transfemoralem Zugang erhöht.

Ein retrograder transpoplitealer Zugang kann in Einzelfällen bei Rekanalisationen am Oberschenkel genutzt werden; der Patient befindet sich dabei in Bauchlage.

Bei vielen Cavafiltern und allen TIPSS-Anlagen ist ein meist rechtsseitiger transjugulärer Zugang notwendig. Der Untersucher steht dann am Kopfende des Patienten.

Für Zugänge zu nichtvaskulären Interventionen (Drainagen, Punktionen, transhepatische Eingriffe) sind unterschiedliche individuelle Positionen notwendig.

Neben der Wahl der Durchleuchtungs- bzw. Aufnahmeparameter, der Dauer der Untersuchung und der Schwierigkeit des Falles hat die Position Einfluss auf die Strahlenexposition des Personals, insbesondere des Arztes. Eine enge Korrelation zwischen der Patientenexposition und der Exposition des Personals wurde nicht gefunden [Renaud 1992, Tryhus 1987]. Dies lässt vermuten, dass das Verhalten des Einzelnen und die Berücksichtigung von Strahlenschutzmaßnahmen einen entscheidenden Einfluss auf die Personendosis haben.

Im Allgemeinen werden Bleigummischürzen mit 0,35 mm Bleigleichwert getragen, die für den Körperstamm einen den gesetzlichen Bestimmungen entsprechenden Schutz bieten. Augenlinse, Schilddrüse und Hände sind dadurch nicht geschützt. Zuverlässige Erfassungen der Expositionen dieser Organe sind derzeit nicht verfügbar. Es ist nicht auszuschließen, dass entgegen gesetzlicher Bestimmungen auf Dosismessungen an den Händen verzichtet wird, so dass unbemerkt Grenzwerte erreicht oder sogar überschritten werden können. Es ist deshalb notwendig, organisatorische Maßnahmen zu ergreifen, damit die vorgeschriebenen Messungen durchgeführt werden (s. Kap. 4.3).

3 Strahlenexposition

3.1 Patient

Ein großer Anteil der Strahlenexposition resultiert aus Filmszenen und Aufnahmeserien.

Bei der inzwischen kaum noch durchgeführten Blattfilm-Angiographie war die Zahl der pro Serie belichteten Filme ein begrenzender Faktor. Die digitale DSA-Technik kann hingegen dazu verführen, dass mehr Aufnahmen pro Serie angefertigt werden als für eine ausreichende Dokumentation nötig sind. Der Bildfrequenz und Länge einer Serie kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Beide Parameter sind so zu optimieren, dass weder eine zu hohe Dosis auftritt noch eine unzureichende diagnostische Bildinformation resultiert (siehe Abb. 4 [Schmidt und Stieve 1996]).

3.1.1 Kardiologie

Der angiographisch tätige Kardiologe muss das schlagende Herz in verschiedenen Interventionsphasen und unterschiedlichen Projektionen darstellen. Wegen des relativ kleinen Objektes reichen Bildverstärker von ca. 23 cm Durchmesser aus. Seit wenigen Jahren werden zunehmend dynamische digitale Festkörperdetektoren (FD) mit besseren Abbildungseigenschaften verwendet. Die mittlere Patientenexposition invasiver kardialer Interventionen ist hoch und variiert in Abhängigkeit von Zentrum und Untersucher für Koronarangiographien und für Koronarangioplastien um den Faktor 20 bis 25 (Abb. 2).

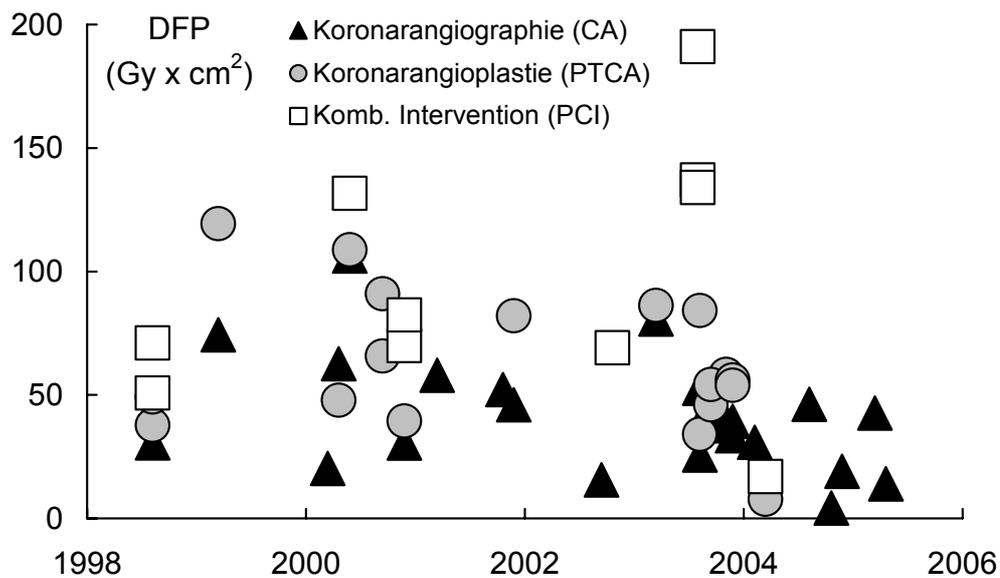


Abb. 2: Variation der mittleren Patientenexposition invasiver kardiologischer Interventionen [Arthur et al. 2002, Bernardi et al. 2000, Betsou et al. 1998, Cusma et al. 1999, Clark et al. 2000, Delichas et al. 2003, Den Boer et al. 2001, Efstatopoulos et al. 2003, Fransson and Persliden 2000, Katritsis et al. 2000, Kuon et al. 2005a, Larrazet et al. 2003, Lobotessi et al. 2001, Neofotistou et al. 2003, Van de Putte et al. 2000]

Die Aufnahmezeit der Serien sollte diagnostisch und therapeutisch hinreichend kurz und die radiographische Bildfrequenz, ebenso wie die fluoroskopische Pulsung, nicht höher als 12,5 bis 15/s sein. Bei Kindern sollte die Aufnahmezeit aufgrund deren höherer Herzfrequenz um 25 bis 30/s liegen, um Bewegungsartefakte auszuschließen. In der invasiven Kardiologie wird in der Regel auf die Subtraktion verzichtet, um Fehler in der Quantifizierung durch Herzbewegungen zu vermeiden.

Die Durchleuchtungszeit ist hierbei ein, jedoch keineswegs der bestimmende Faktor der Patientenexposition in der elektiven Koronardiagnostik: isoliert betrachtet erlaubt ihre Optimierung eine Dosisreduktion bis zu 20 %. Die konsequente Reduktion radiographischer Bilder und Serien kann mit einem Dosisreduktionspotential von > 60 % weitaus größer sein. Eine weitere entscheidende Einflussgröße mit bis zu 45 % Dosisersparpotential ist die Optimierung der Bildverstärkereingangsdosisleistung auf „adäquate“ statt „bestmögliche“ Bildqualität und die konsequente Einblendung [Kuon 2005b]. Eine nachhaltige Beherrschung strahlenhygienisch optimierter Untersuchungstechniken ist nach mehreren Monaten Training gegeben und verlängert die Interventionszeit nicht.

Aus strahlenhygienischer Sicht sollten extreme laterale Röhrenangulationen $\geq 50^\circ$, die zudem $\geq 20^\circ$ kranio-kaudal geneigt sind, möglichst vermieden werden [Kuon 2004b].

Neue Geräteentwicklungen ermöglichen durch eine vorwählbare Serienbegrenzung mittels Triggerung der radiographischen Bilderanzahl auf einen Herzzyklus eine Dosisreduktion auf $< 10\%$ des derzeit publizierten mittleren Dosisniveaus [Kuon et al. 2005a].

Unter Berücksichtigung aller neu entwickelten strahlenhygienischen Arbeitstechniken beträgt die mittlere effektive Patientendosis einer diagnostischen Koronarangiographie nur < 1 mSv. Sie ist damit vergleichbar der mittleren effektiven Patientendosis einer computertomographischen Koronarkalkbestimmung bzw. geringer als diese sowie erheblich geringer als die nichtinvasive Koronarangiographie mittels EBT oder MSCT. An dieser Stelle wird das eingriffsbedingte Risiko nicht einbezogen. Diese unter elektiven Bedingungen erarbeiteten dosisreduzierenden Arbeitstechniken sind auch in Notfallsituationen effizient umsetzbar.

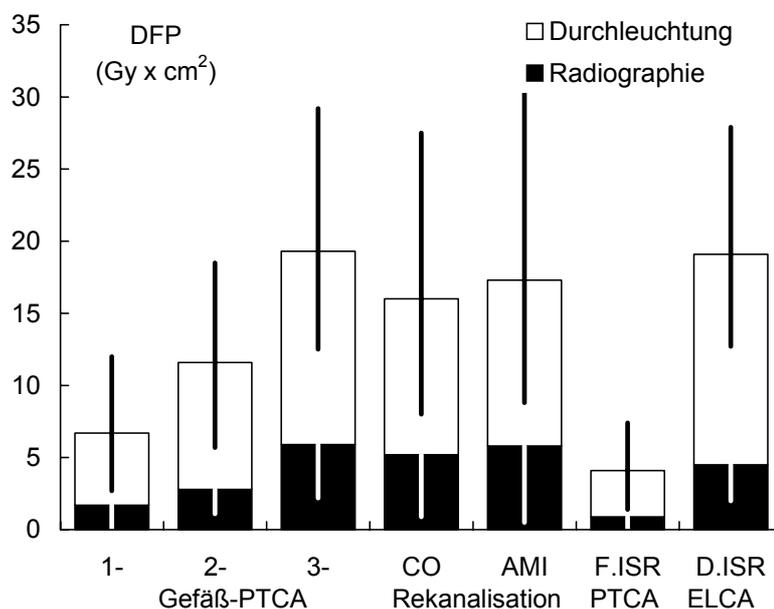


Abb. 3: Mittlere Dosiflächenprodukte (DFPs) für elektive 1-, 2- und 3-Gefäß-PTCA, Rekanalisation chronischer Gefäßverschlüsse (CO), Notfallrekanalisation im frischen Myokardinfarkt (AMI), für 1-Gefäß-PTCA fokaler In-Stent-Rezidivstenosen (F.ISR) und für Excimer-Laserangioplastie diffuser In-Stent-Rezidivstenosen (D.ISR) unter optimierter Arbeitstechnik [Kuon 2004a]

3.1.2 Besonderheiten der Kinderkardiologie

In der Kinderkardiologie werden überwiegend Katheterisierungen zu diagnostischen Zwecken vorgenommen. Die Zahl der Interventionen nimmt allerdings mit zunehmender Erfahrung der Kinderkardiologen auf diesem Gebiet und durch Verbesserung der Untersuchungs- und Behandlungstechniken stetig zu, z.B. bei der Therapie des offenen Ductus arteriosus Botalli (Verbindung zwischen Aorta und Pulmonalarterie) und zum Verschluss des Vorhofseptumdefektes (Öffnung zwischen den beiden Vorhöfen des Herzens). Je nach Lage und Größe der Defekte setzt man sogenannte „Schirmchen“ (Occluder) mit Hilfe eines Katheters ein, um den Defekt zu schließen.

Katheterisiert werden bei Kindern fast ausschließlich angeborene Herz-Gefäß-Anomalien. Kinder, an denen üblicherweise im Alter zwischen 2 bis maximal 8 Jahren eine Herzoperation oder eine radiologische Intervention durchgeführt wurde, in zunehmendem Maße auch Neugeborene und Säuglinge, sind meistens bis ins Erwachsenenalter regelmäßig radiologischen Kontrolluntersuchungen unterzogen worden (s. Tab. 4). Wiederholungsuntersuchungen werden heute weitgehend durch Kernspintomographie und Echokardiographie ersetzt. Weitere Erhebungen lassen deshalb noch niedrigere Werte erwarten.

Tab. 4: *Alter, Durchleuchtungszeit und Dosisflächenprodukt DFP bei diagnostischen und interventionellen Herzkatheteruntersuchungen an Kindern (nach [Barchert et al. 2005])*

	Diagnostische Herzkatheteruntersuchungen n=28		Interventionelle Herzkatheteruntersuchungen n=32	
	median	Bereich	median	Bereich
Alter (Jahre)		0,1-9,2		0,3-7,8
Durchleuchtungszeit (s)	294	30-1.992	456	182-3.612
DFP (cGy x cm²)	548	114-1.461	472	282-2.044

Die Indikation zu einer interventionellen Maßnahme muss bei Kindern besonders sorgfältig geprüft werden. Bei angeborenen Aorten-, Klappen- und Pulmonalstenosen sowie bei Ventrikelseptumdefekten werden anstelle einer Operation am offenen Herzen auch perkutane transluminale Valvuloplastien oder Ballondilatationen durchgeführt. Die Zahl von Herzrhythmusstörungen als Folge von Herzoperationen hat zugenommen. Elektrophysiologische Maßnahmen, wie die Hochfrequenzablation, werden bei Tachykardien und Sinusknotenfunktionsstörungen eingesetzt.

3.1.3 Allgemeine interventionelle Radiologie

Fluoroskopische Interventionen werden von Radiologen in fast allen Bereichen des Körpers durchgeführt. Die Maßnahmen sind dabei nicht nur auf die Gefäße beschränkt. Hierfür sind meistens große Detektorformate (bis zu 40 cm Durchmesser) notwendig, um z.B. gleichzeitig symmetrische Strukturen, wie die Beine oder die Nieren, überblicken zu können.

Tab. 5 zeigt anhand einer Erhebung (Stichprobe) der Arbeitsgemeinschaft Interventionelle Radiologie (AGIR) die 10 häufigsten Interventionen in Deutschland im Jahr 2003.

Tab. 5: Die 10 häufigsten Interventionen (n= 25.540) nach ([AGIR2003])

Art der Intervention	Anzahl	%
Ballon-PTA	10.001	39
Arterieller Stent	3.251	12,5
Histologiegewinnung	2.165	8,5
Perikardikuläre Therapie	1.561	6
Lyse	846	3,5
Facettenblockade	696	3
Cytologiegewinnung	647	2,5
Schmerztherapie	575	2,5
Port-Anlage venös	573	2,5
Abszessdrainage	545	2
Sonstige	4.680	8

Aufgrund einer Markterhebung des Bundesverbandes Medizintechnologie e.V. aus dem Jahr 2006 liegen deutschlandweit die folgenden Verkaufszahlen vor:

PTA:

Ballons (Total):	122.500
Diagnostische Katheter:	260.000
Führungsdrähte:	260.000
Stents (Total):	40.500
Ballon Exp.:	13.000
Selbstexp. Peripherie:	21.000
Selbstexp. Carotis:	6.000
Covered Stents:	500

Insofern kann man von etwa 120.000 überwiegend peripheren PTA-Eingriffen pro Jahr ausgehen.

Die Lokalisationen der perkutanen transluminalen Angioplastie (PTA) nach Erhebungen der Arbeitsgemeinschaft Interventionelle Radiologie (AGIR) aus dem Jahr 2003 sind in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Lokalisationen der perkutanen transluminalen Angioplastie (PTA) (nach [AGIR 2003])

PTA-Lokalisation	Anteil in %
A. femoralis superficialis	36
A. iliaca communis	16
A. poplitea	13
A. iliaca externa	11
Dialyse-Shunt	4
A. renalis	4
A. femoralis	3
Truncus tibiofibularis	2
A. tibialis anterior	2
Andere	9

Bei der Embolisation ist die Datenlage nicht eindeutig. Es wird jedoch von ca. 9.700 Embolisationen ausgegangen.

Die Pulsfrequenz bei der Durchleuchtung muss hoch genug sein, um die Katheterposition sicher kontrollieren zu können. Im Allgemeinen sind 7,5 bis 15 Bilder/s hierfür ausreichend. Die digitale Subtraktion dient der besseren Erkennung und gegebenenfalls der Reduktion der Kontrastmittelmenge.

Die Strahlendosis und die verwendete Kontrastmittelkonzentration sind bei gleichem Signal/Rauschverhältnis voneinander abhängig. Es gilt:

$$D \sim 1 / K^2 \quad [\text{Zeitler und Schmidt 1987}],$$

wobei D die Dosis und K die Kontrastmittelkonzentration bezeichnen.

Prinzipiell gelten für die allgemeine interventionelle Radiologie ähnliche Überlegungen wie in der interventionellen Kardiologie hinsichtlich Durchleuchtungszeit, Dosisflächenprodukt, effektiver Dosis und Altersverteilung.

Die Abb. 4 zeigt das Dosisflächenprodukt (DFP) bei verschiedenen Durchleuchtungszeiten am Beispiel der perkutanen transluminalen Angioplastie (PTA). Während bei konventionellen Anlagen eine weitgehende Proportionalität zwischen Dosisflächenprodukt und Durchleuchtungszeit zu beobachten ist, gilt dies für digitale Anlagen nicht mehr. Dies ist erklärlich durch die Wahl der verschiedenen Kennlinien als auch der verschiedenen Programme z.B. hinsichtlich Pulshöhe, -dauer und -pausen. Der Abb. 4 ist außerdem zu entnehmen, dass eine generelle Aussage: „Digitale Anlagen führen zu einer Dosisreduzierung“ nicht gilt. Zum gleichen Ergebnis kommen auch Untersuchungen im Klinikum Augsburg [Schmidt und Stieve 1996].

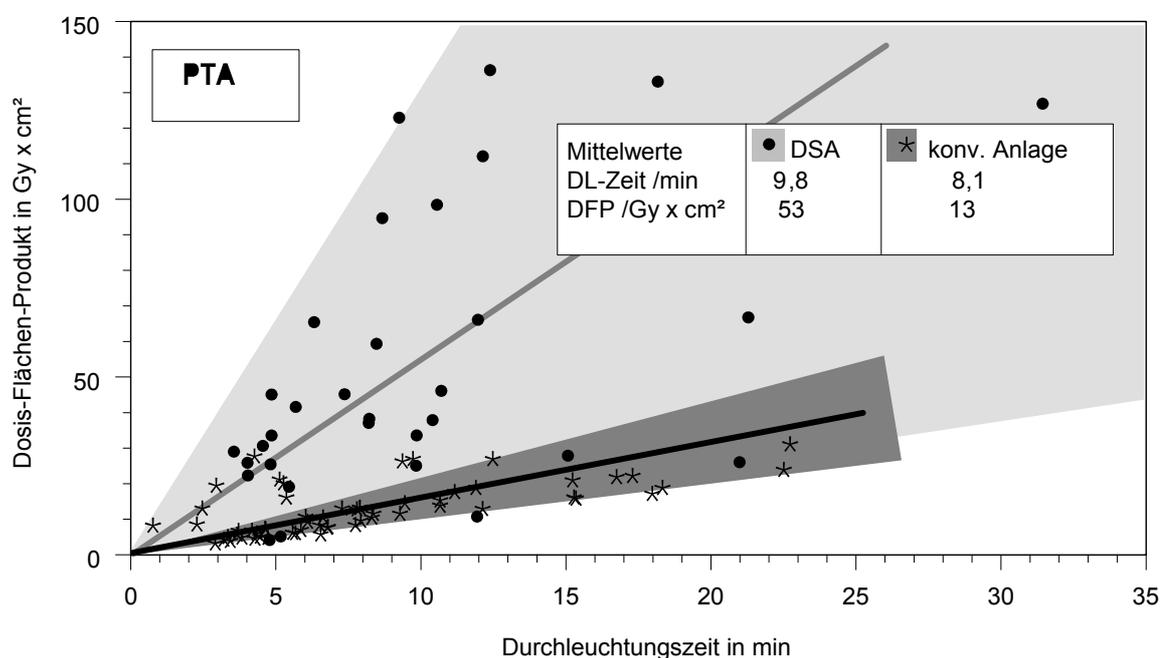


Abb. 4: Dosisflächenprodukt und Durchleuchtungszeit; Gegenüberstellung von digitaler Subtraktionsangiographie (DSA) und konventioneller Röntgenanlage bei gleicher Fragestellung

An 16 verschiedenen großen deutschen Krankenhäusern wurde die Verteilung der mittleren Durchleuchtungszeiten für die Angioplastie mit mindestens 100 Interventionen pro Krankenhaus erhoben. Die Angaben beziehen sich insgesamt auf mehr als 6.200 Patienten. Die mittlere Durchleuchtungszeit (Median) betrug 13,9 min, minimal 8,5 min und maximal 28,4 min. Mit angegeben wurden die erste (11,7 min) und dritte Quartile (18,0 min).

Weiterhin wurde an den 16 Krankenhäusern mit mindestens 30 Embolisationen pro Krankenhaus die Verteilung der mittleren Durchleuchtungszeit für Embolisationen erhoben. Insgesamt beziehen sich die Angaben auf mehr als 800 Patienten. Die mediane Durchleuchtungszeit betrug 18,0 min, die minimale 8,6 min

und die maximale 52,1 min. Mit angegeben wurden die erste (15,4 min) und dritte Quartile (29,1 min).

Bei der Angioplastie wurden für die Durchleuchtungszeit Unterschiede um den Faktor 3, bei der Embolisation fast um den Faktor 8 erhoben. Bei den Angioplastien zeigten die Untergruppen, wie z.B. Beine und Becken, ähnliche Streubreiten wie die Gesamtheit.

Erhebungen von Seifert [Seifert et al. 2000] erbrachten ähnliche Ergebnisse. Die großen Unterschiede (Faktor 3 bis 5) sind sicherlich z.T. auf verschiedene Röntgenanlagen zurückzuführen. In Tab. 7 ist eine Literaturlauswertung für die Durchleuchtungszeit bei interventionellen Maßnahmen (ohne Herz) zusammengestellt.

Tab. 7: Beispiele für die mittleren Durchleuchtungszeiten bei verschiedenen Interventionen (ohne Aufnahmen, Dokumentation, DSA-Serien usw.)

Autor	mittlere DL-Zeit in min	Behandlungen
Stargard und Alzen 1994	18,8	PTA
EU 1993, Deutschland	14	PTA
Fischer et al. 1995	19,7	PTA
Giacomuzzi und Erckert 1995	10-20	PTA
Payne 1994	87	TIPSS
EU 1993, Deutschland	44	TIPSS
Meier et al. 1995	69	TIPSS
Giacomuzzi und Erckert 1995	20-60	TIPSS
Huda and Peters 1995	110	Neuroembol. (ein Fall)
Berthelsen and Cederblad 1991	59,8	Neuroembolisation
Bergeron et al. 1994	43,3	Neuroembolisation
EU 1993, Italien	44,7	Neuroembolisation
Giacomuzzi und Erckert 1995	20-60 60-180	Neuroembolisation
Norbash et al. 1996	39	Neuroembolisation
Theodorakou and Horrocks 2003	Mittlere DLZ 16 min (lat) 12 min (pa) (Einzelfälle bis 50 min)	Neuroembolisation
Seifert et al. 2000	17,2	Embolisationen
Seifert et al. 2000	9,7	PTA

Wie verschiedene Arbeiten gezeigt haben (z.B. [EU 1993]), ist die Durchleuchtungszeit *allein* wenig aussagekräftig hinsichtlich der Exposition des Patienten. Wie Abb. 4 zeigt, ist insbesondere bei digitalen Anlagen einerseits kaum eine Korrelation zwischen Durchleuchtungszeit und Exposition herzustellen und andererseits ist in der Durchleuchtungszeit die Exposition aufgrund von Aufnahmen nicht mit erfasst. Bei der PTA und Embolisation sind die Dosisbeiträge von

Aufnahmen und Durchleuchtungen etwa gleich [Schmidt und Stieve 1996]. Bei transjugulären intrahepatischen porto-systemischen Stent Shunts (TIPSS) und Lyse beträgt dagegen das Verhältnis von Aufnahme- und Durchleuchtungsdosis etwa 1:2 [EU 1993]. Bei konsequenter Anwendung der gepulsten Durchleuchtung kann der Anteil des durchleuchtungsbedingten DFP auf bis zu ca. 3 % des Gesamt-DFP abgesenkt werden (üblich ist z. Zt. ein Verhältnis von etwa 50 % zu 50 %). Daher ist auch die Frage der notwendigen Aufnahmen für Dokumentationen und deren Dosisbedarf in die Strahlenschutzüberlegungen einzubeziehen [Schmidt und Stieve 1996].

Für die Vorhersage von *deterministischen Schäden* ist die Kenntnis der Oberflächendosis von Bedeutung. Die Oberflächendosis kann entweder direkt gemessen (Thermolumineszenzdosimeter) oder aus Einstell- und Geometriedaten abgeschätzt werden. In Tab. 8 sind einige Durchschnittswerte verschiedener Autoren für interventionelle Maßnahmen zusammengestellt. Bei den angegebenen Maximalwerten sind Reaktionen der Haut nicht auszuschließen.

Tab. 8: *Beispiele für Mittelwerte der Oberflächendosen (mGy) und Dosisflächenprodukte (cGy × cm²) bei verschiedenen Interventionen (beim Dosisflächenprodukt ist jeweils der Gesamtbetrag, unabhängig von Projektionsrichtung und Expositionsmode (Aufnahme oder DL), erfasst)*

Autor	Mittlere Oberflächendosis im mGy	Mittleres DFP in cGy x cm²	Behandlungen
EU 1993, Deutschland	-	7.500	PTA
Mini und Schneeberger 1995	40-3.800 (Einfalldosis)	1.000-52.500	PTA
Fischer et al. 1995		7.500	PTA
Stargard und Alzen 1994	219		
EU 1993, Italien		7.200	PTA (Neuro)
EU 1993, Italien		24.800	Neuroembolisation
Bergeron et al. 1994	615	11.600	Neuroembolisation
Theodorakou and Horrocks 2003	770 (pa) 780 (lat)	4.800 (pa) 5.800 (lat)	Neuroembolisation
Mooney et al. 2000	max. 4.000		Neuroembolisation
Struelens et al. 2005	max. 5.400		Neuroembolisation
Marshall et al. 1995		12.200	Neuroembolisation
EU 1993, Deutschland		22.000	TIPSS
Meier et al. 1995	4.900		TIPSS
Hidajat et al. 1996	440 318		Chemoembol. Laserangioplastie

Für eine Beurteilung des patientenbezogenen Risikos ist die Kenntnis der effektiven Dosis, die Dosis kritischer Organe (z.B. Brustdrüsen und Geschlechtsorga-

ne bei Jugendlichen) bzw. der Hautdosis am Expositionsort und des Alters des Patienten notwendig. Für eine Abschätzung der effektiven Dosis wird im Allgemeinen vom Dosisflächenprodukt (siehe auch Tab. 8) ausgegangen. Das Dosisflächenprodukt kann wie in der Kardiologie (s. Kap. 3.1.1) in Anlehnung an die Publikation NRPB 262 [Hart et al. 1994] mit der effektiven Dosis verknüpft werden.

Für die Einschätzung des stochastischen Risikos ist der Ort der Intervention (Schädel, Thorax, Abdomen, Extremitäten) von Bedeutung. Laut AGIR-Register [AGIR 2003] betreffen 56 % der Untersuchungen das Bein, 27 % das Becken (Shunts) und 4% sonstige Regionen inklusive Carotis 13 % (s.a. Tab. 6).

Neben den Extremitäten (Beine) werden die meisten Interventionen im Becken-Abdomen-Bereich durchgeführt. Trotz der relativ hohen Exposition ist die effektive Dosis, z.B. bei Interventionen an den Extremitäten, klein. Dies gilt hingegen nicht für Eingriffe im Beckenbereich: hier sind bei gleichen Durchleuchtungszeiten die Dosisflächenprodukte DFP's um ein Vielfaches erhöht.

Bei einer durchschnittlichen Durchleuchtungszeit zwischen 8,7 und 10,3 Minuten und jeweils 12 Eingriffen betrug das DFP bei angioplastischen Eingriffen im Becken $4.040 \text{ cGy} \times \text{cm}^2$, am Bein $1.070 \text{ cGy} \times \text{cm}^2$ und am Arm (Shunt-Angioplastie) $2.200 \text{ cGy} \times \text{cm}^2$ (Klinikum Ingolstadt).

Die Altersverteilung der Patienten in der interventionellen Radiologie unterscheidet sich, ebenso wie in der interventionellen Kardiologie, deutlich von der Gesamtbevölkerung und ist bei der Beurteilung des stochastischen Risikos in Betracht zu ziehen. Mit dem Alter des Patienten und der Abnahme der Lebenserwartung sinkt die Gefahr eines letalen stochastischen Schadens [Hjadat et al. 1996].

Anders hingegen ist das Risiko bei jüngeren Patienten und Kindern zu bewerten. Dies gilt insbesondere für neuere Techniken, wie z.B. die Myomembolisationen, die bevorzugt bei Frauen im jüngeren und mittleren Alter durchgeführt werden. Hier müssen alle geeigneten Maßnahmen zur effektiven Dosisreduktion einschließlich reduzierter Bildserien, Bildfrequenzen und Bildaufnahmedosen getroffen werden. Diese Maßnahmen sind geeignet, die Dosis erheblich zu mindern ohne eine Beeinträchtigung der Qualität bei der Intervention zu erleiden.

In Abb. 5 ist die Altersverteilung der Patienten, bezogen auf alle Interventionen, nach [AGIR 2003] skizziert. Das Durchschnittsalter der Bevölkerung Deutschlands liegt im Vergleich dazu bei 42 Jahren [Statistisches Bundesamt 2007].

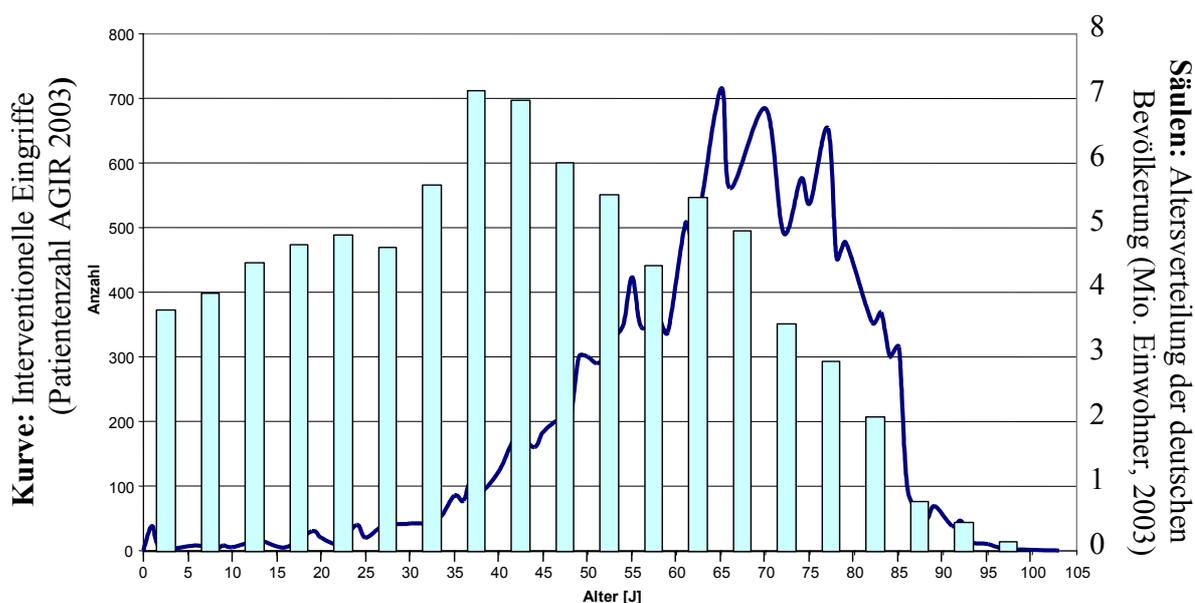


Abb. 5: Altersverteilung bei Interventionen im Vergleich zur deutschen Gesamtbevölkerung (nach [AGIR 2003, Statistisches Bundesamt 2007])

In Anlehnung an ICRP 60 [ICRP 1990] Anhang C.5 liegt das Strahlenrisiko der Patienten aufgrund der Altersverteilung deutlich unter dem der Allgemeinbevölkerung. Unter Berücksichtigung der höheren Risiken, die mit Operationen verbunden sind, besteht daher für interventionelle Maßnahmen trotz hoher Strahlenexposition fast immer eine rechtfertigende Indikation.

3.1.4 Neurointerventionen

Besondere Aufmerksamkeit verdienen Interventionen in der Neuroradiologie. Interventionelle neuroradiologische Eingriffe zeigen in den letzten Jahren erhebliche Zuwachsraten (Tab. 9). Bei einer Reihe zerebrovaskulärer Erkrankungen stellt die endovaskuläre interventionelle Therapie mittlerweile eine schonende Therapiealternative dar oder ist, wie bei zerebralen Aneurysmen, mittlerweile die Behandlungsmethode der Wahl. Eine prospektive, randomisierte Studie, die das endovaskuläre Coiling mit ablösbaren Platinspiralen mit dem chirurgischen Clipping verglich, musste nach einem Jahr vorzeitig abgebrochen werden, da die Outcome-Daten der endovaskulär behandelten Patienten den chirurgischen deutlich überlegen waren [Molyneux et al. 2002, 2005].

Auch die Stentimplantationen in der Behandlung von Stenosen der A. carotis verzeichnen erhebliche Zuwachsraten. Im Vergleich dazu werden auch arteriovenöse Malformationen (AVM) oder intrakranielle Stenosen zunehmend häufiger endovaskulär behandelt.

Tab. 9: Häufigkeit neuroradiologischer Interventionen in Deutschland (persönliche Kommunikation: Dörfler, Abteilung für Neuroradiologie, Universitätsklinikum Erlangen)

	2002	2003	2004	2005
Carotis-Stenting	3.600	4.250	5.300	6.500
Aneurysma-Coiling	1.850	2.150	2.650	3.000

Wegen der Komplexität der Eingriffe können sich insbesondere bei den zerebralen Angiomembolisationen erhebliche Expositionszeiten ergeben (siehe auch Tab. 7).

Literaturangaben zur Strahlenexposition bei neurointerventionellen Eingriffen, und damit vorrangig zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens deterministischer Schäden, sind sehr heterogen. Während Bergeron et al. [Bergeron et al. 1994] aufgrund der registrierten Durchleuchtungszeit eine Hautreaktion ausschließen, beobachten Huda und Peters [Huda and Peters 1994] oder Mooney et al. [Mooney et al. 2000] in einigen Fällen eine temporäre Alopezie und andere Hautreaktionen. Die maximale, mit Thermolumineszenz-Dosimetern gemessene Oberflächendosis während der AVM-Embolisationen betrug hierbei 6 bzw. 4 Gy. In Einzelfällen wurden Durchleuchtungszeiten von bis zu 100 Minuten (29 Aufnahmeserien) erreicht. Ähnliche Ergebnisse zeigen die Untersuchungen von Struelens et al. [Struelens et al. 2005], die die Oberflächendosis am Kopf während diagnostischer und interventioneller neuroradiologischer Untersuchungen mittels Thermolumineszenz-Dosimetern erfassten. Während bei den diagnostischen Untersuchungen der Schwellenwert für deterministische Effekte von 2 Gy nicht annähernd erreicht wurde (Oberflächendosen < 320 mGy), zeigten sich bei den zerebralen Embolisationen maximale Oberflächendosen bis zu 5,4 Gy. Hierbei zeigten sich, abhängig vom Untersucher und von der Institution, erhebliche Unterschiede, die natürlich auch in der Komplexität der verschiedenen zugrundeliegenden Läsionen und interventionellen Behandlungen begründet waren.

Bei neuroradiologischen Interventionen sind besonders die möglichen Spätreaktionen der kritischen Organe, wie Auge und Schilddrüse, zu beachten. Bei Patienten mit neuroradiologischen Interventionen am Kopf sollte durch entsprechende Positionierung (z.B. pa-Strahlengang) die Dosis am Auge so gering wie möglich gehalten werden (Tab. 2). Eine einfache, aber effektive Methode der Dosisreduktion für den Untersucher ist die Platzierung der lateralen Röntgenröhre auf der dem Untersucher gegenüberliegenden Tischseite.

Die Durchschnittsdosis am rechten (der Röntgenröhre zugewandten) Auge des Patienten betrug bei Theodorakou und Horrocks [Theodorakou and Horrocks 2003] 60 mGy (lat- und pa-Strahlengang addiert), an der Schilddrüse 24 mGy. Auch die Dosis am Auge des Untersuchers wurde während 17 Behandlungen gemessen und betrug durchschnittlich unkritische 0,13 mGy (max. Wert 0,47 mGy). Dabei zeigte sich eine eher schlechte Korrelation des gesamten Dosisflächenproduktes mit der Durchleuchtungszeit. Daher unterschätzt ein Monitoring der Durchleuchtungszeit das Potential einer Hautschädigung. Hingegen zeigte sich eine gute Korrelation von Dosisoberflächenprodukt und Anzahl der Aufnahmeserien.

Tab. 10: Oberflächendosis in mGy und effektive Dosis in mSv bei Neurointerventionen

Autor	Oberflächendosis in mGy	Effektive Dosis in mSv
Bergeron et al. 1994	615 (187-1.335)	1,67 (0,44-3,44)
Chopp et al. 1980	159 ± 45	-
Feygelman et al. 1992	-	16,6
Berthelsen and Cederblad 1991	660-1.400	6-43
Huda and Peters 1994	6.600*)	30*)
Habermaas 1995	-	23,8 (8,5-61,2)
Norbash et al. 1996	1.510 ± 880 960 ± 640 **)	-
Theodorakou and Horrocks 2003	770 (pa) 780 (lat)	
Mooney et al. 2000	bis zu 4.000	
Struelens et al. 2005	bis zu 5.400	
O`Dea et al. 1999	bis zu 5.400	
Marshall et al. 1995		3,6 (diagn. 4-Gefäßangiographie)

*) ausgewählter Fall

***) mit Zusatzfilterung

Die im Rahmen der Neurointerventionen verwendeten Materialien sind sehr klein (Mikrokatheter, Mikrodrähte, Coils etc.). Die Anforderungen an die Bildqualität während der Durchleuchtung sind deshalb sehr hoch. Zwei-Ebenen-Systeme sind mittlerweile als Standard für die Neurointerventionen zu fordern. Hilfreich ist außerdem die 3D-Rotationsangiographie, die das Leistungsspektrum der diagnostischen Angiographie deutlich erweitert hat. Vor allem komplexere Gefäßabschnitte können damit dreidimensional in beliebigen Projektionen dargestellt werden. Die endovaskuläre Therapieplanung wird dabei insbesondere bei zerebralen Aneurysmen erheblich erleichtert. Vergleichende Untersuchungen zur 3D-Rotations-Angiographie und konventionellen zerebralen Angiographie ergaben deutlich niedrigere Dosiswerte für die 3D-Rotations-Angiographie (maximale Hauteintrittsdosis in der Rotationsangiographie 15 mGy versus 58 mGy in der

konventionellen Angiographie; kumulative Einfallsdosis in der Rotationsangiographie 33 mGy versus 53 mGy in der biplanaren Angiographie [Schueler et al. 2005]).

Eine nicht zu unterschätzende kumulative Strahlendosis kann bei Patienten mit akut rupturierten zerebralen Aneurysmen auftreten, die im Rahmen der Akutdiagnostik zunächst mittels CT und CT-Angiographie diagnostiziert und unmittelbar im Anschluss endovaskulär behandelt werden (Coiling). Aus Strahlenschutzgründen sollte hier die Serienanzahl der Angiographie so gering wie nötig gehalten werden. Die Rotationsangiographie oder auch die 3D-Visualisierung der CT-Angiographie können beim schnellen Auffinden der „Arbeitsprojektion“ für die endovaskuläre Therapie sehr hilfreich sein und damit Serien sparen.

Bei der Durchführung der Eingriffe an geeigneten neuroradiologischen Zentren durch einen im Strahlenschutz erfahrenen Untersucher ist in der interventionellen Neuroradiologie kein deterministischer Schaden zu erwarten. Andererseits zeigen die Literaturdaten, dass bei neurointerventionellen Embolisationen in Einzelfällen die Schwellenwerte für deterministische Effekte erreicht oder überschritten werden. Notwendig ist daher ein Monitoring der Oberflächendosis dieser Patienten und die Aufklärung über diese möglichen Reaktionen. Auf jeden Fall aber sollten (elektive) neurointerventionelle Eingriffe in Zentren mit hohen Fallzahlen und dadurch entsprechend ausgeprägter Expertise durchgeführt werden.

3.1.5 Vertebroplastie

Vertebroplastien und Kyphoplastien werden zunehmend zur minimal-invasiven Behandlung osteoporotischer Wirbelkörper-Kompressionsfrakturen, zur Linderung von vertebrogenen Schmerzen bei osteolytischen Metastasen und in der Therapie symptomatischer Wirbelkörperhämangiome eingesetzt. Vereinzelt sind hierbei lange Durchleuchtungszeiten beschrieben, die mit einer erhöhten Exposition der behandelten Patienten einhergehen [Fituosi et al. 2006, Ortiz et al. 2006]. So betrug die mittlere Durchleuchtungszeit für die Kyphoplastie 10 ± 2 Minuten. Die mittlere effektive Dosis betrug dabei 8,5 bis 12,7 mSv, die mittlere gonadale Dosis (abhängig von der Lokalisation des behandelten Wirbelkörpers) 0,04 bis 16,4 mGy. Hautschäden durch Vertebro- bzw. Kyphoplastien sind insgesamt unwahrscheinlich, wenn der Röhren-Haut-Abstand >35 cm beträgt.

Auch die Untersucherdose ist nicht zu unterschätzen. So ergaben Messungen Dosiswerte von bis zu 3,2 mGy über und 0,47 mGy unter der Bleischürze. Die Dosen an der Hand lagen mit bis zu 8,5 mGy deutlich höher. Durch spezielle

Knochenzementinjektoren kann die Strahlendosis für den Untersucher deutlich reduziert werden [Mehdizade et al. 2004, Kallmes et al. 2003, Komemushi et al. 2005, Perisinakis et al. 2004].

3.2 Personal

Eine Korrelation zwischen der Exposition des Patienten und der des Personals kann nicht erwartet werden, weil letztere von einer Vielzahl von Faktoren abhängt. Hierzu zählen:

- der Abstand zum Nutzstrahlenfeld bzw. die Katheterisierungsstechnik,
- das behandelte Organ,
- die Körpermaße des Patienten,
- die individuelle Situation und die dadurch bedingte Untersuchungsdauer,
- die verwendeten Einstellparameter der Röntgeneinrichtung,
- die Erfahrung des Arztes,
- die Kooperationsbereitschaft bzw. -fähigkeit des Patienten,
- die Verwendung raumfester oder persönlicher Strahlenschutzmittel,
- die Wahl der Kontrastmittelkonzentration (hoch oder niedrig) und
- die Wahl unterschiedlich strahlenabsorbierender Interventionshilfsmittel (z.B. Katheter).

Wie Eder [Eder 1995] in prinzipiellen Messungen nachwies, kommt den raumfesten Strahlenschutzvorrichtungen entscheidende Bedeutung zu. Bei Verwendung einer Dauerschutzeinrichtung mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm kann die Strahlenschutzschürze mit 0,25 mm Bleigleichwert ausreichend sein, was zu einer erheblichen Gewichtsreduzierung führt. Dies ist wegen der häufig langen Untersuchungszeiten im Stehen und der auch sonst hohen Belastung des Untersuchers von besonderer Bedeutung, um körperliche Belastungen auf Wirbelsäule und Schultergelenk zu reduzieren.

In Tab. 11 sind Messwerte für die Exposition von Hand und Augen des Untersuchers, an denen am ehesten mit einer Grenzwertüberschreitung zu rechnen ist, angegeben. Nicht zum Ausdruck kommen dabei die häufig erheblichen Streuungen, die abhängig sind von der Schwierigkeit des Falles, der Erfahrung des Untersuchers u.Ä. Nahezu alle Untersuchungen haben dabei ergeben, dass die Exposition des ärztlichen Assistenzpersonals geringer als die des Untersuchers ist.

Tab. 11: Messwerte für die Exposition von Händen und Augen des Untersuchers bei verschiedenen Interventionen; *Organdosis pro Untersuchung in mSv*

Untersuchungsart	Hände	Augen	Autor
PTA (DSA)	0,5	0,2	Fischer et al. 1995
PTA (DSA)	0,22	0,07	Wucherer, Schmidt 1995
PTA konv.	0,05	0,025	Wucherer, Schmidt 1995
Embolisation	0,25	0,23	Fischer et al. 1995
Embolisation	2,2	0,5	Habermaas 1995
Chemoembolisation	0,21	0,15	Hidajat et al. 1996
Laserangiographie	0,713	0,135	
Neurointerventionen	0,1	0,07	Berthelsen and Cederblad 1991
PTCD	0,003-1,3		Vehmas 1993
TIPSS	0,7	0,4	Giacomuzzi und Erckert 1995
TIPSS	0,7	0,4	Meier et al. 1995

Unter Zugrundelegung der Grenzwerte nach der RöV für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A liegt die maximal zulässige Anzahl von Interventionen in der Größenordnung von 100 bis 1.000 pro Jahr. Berücksichtigt man, dass der gleiche Untersucher auch diagnostische Röntgenuntersuchungen durchführt, die zur gesamten beruflichen Exposition beitragen, reduziert sich diese Zahl erheblich.

Nach [Fischer et al. 1995] kann in grober Näherung das Dosisverhältnis von diagnostischer Angiographie zu Intervention mit 1:1,5 angenommen werden.

In der Kardiologie ist bei Kindern im Gegensatz zur Erwachsenenkardiologie, bei der Schrägprojektionen bevorzugt werden, der laterale Strahlengang erforderlich. Bezogen auf die gesamte radiologische Maßnahme überwiegt in der Kinderkardiologie allerdings die ap-Projektion gegenüber der lateralen deutlich. Der Standort des behandelnden Arztes beim lateralen Strahlengang – das gilt auch für die Katheterisierungstechnik – ist unmittelbar neben dem Röntgenstrahler. Die Ortsdosisleistung im Bereich des Rumpfes des Untersuchers liegt in der Größenordnung von 900 $\mu\text{Sv/h}$.

Von den amtlichen Auswertestellen für Personendosimeter liegen kaum Informationen über Teilkörperdosen bei interventionellen Maßnahmen vor, weil zusätzliche Teilkörperdosimeter kaum benutzt werden bzw. Messungen am Kopf gar nicht vorgeschrieben sind. Deshalb darf dies keinesfalls zu dem Schluss führen, dass die Grenzwerte tatsächlich nicht erreicht werden. Diese Situation ist unbefriedigend. Deshalb werden in Kap. 4.3 entsprechende Maßnahmen empfohlen (s. a. Kap. 5 Nr. 11). Es sei zusätzlich auf § 40 RöV hingewiesen.

4 Maßnahmen zur Dosisreduzierung

Es sind 2 Gruppen von Maßnahmen zur Dosisreduzierung zu unterscheiden:

- Organisatorische Empfehlungen
- Technische Anforderungen.

4.1 Organisatorische Empfehlungen

4.1.1 Qualifikation

Um das Ziel der interventionellen Maßnahmen unter dem Aspekt des ALARA-Prinzipes zu erreichen, ist ein besonderes Wissen (Fachkunde) des Anwenders hinsichtlich

- Strahlenschutz,
- Gerätetechnik,
- Einsatz der Gerätetechnik entsprechend der klinischen Fragestellung,
- Bildqualität usw.

notwendig.

Diesen Aspekten kommt in der interventionellen Radiologie wegen der hohen Exposition des Patienten besondere Bedeutung zu. Die Strahlenexposition des Patienten hängt in vielen Fällen mehr von dem Vorgehen des Arztes als von den technischen Gegebenheiten ab. Die Strahlenschutzkommission erachtet deswegen eine ergänzende Fachkunde für die interventionelle Radiologie und interventionelle Kardiologie für notwendig. Ziel der ergänzenden Fachkunde ist es insbesondere,

- das Bewusstsein für die auftretenden hohen Dosen weiterzuentwickeln,
- die Abhängigkeit der Dosis von verschiedenen technischen Parametern zu verdeutlichen,
- über typische Anwendungsgeräte und Szenarien zu informieren und
- den Arzt anhand publizierter Dosiswerte zu schulen, einen Dosisvergleich durchzuführen, und seine Untersuchungstechnik zu optimieren.

In der neuen Richtlinie „Fachkunde und Kenntnisse im Strahlenschutz bei dem Betrieb von Röntgeneinrichtungen in der Medizin oder Zahnmedizin – Richtlinie zur Röntgenverordnung“ [FK-RL 2006] sind erstmals Regelungen zur interventionellen Radiologie enthalten. Hiernach ist zum Erwerb der Fachkunde „Anwendung von Röntgenstrahlen bei Interventionen“ ein Spezialkurs „Interventionsradiologie“ von 4 Stunden notwendig, für den der Spezialkurs Röntgen-

diagnostik vorausgesetzt wird. Zum Erwerb der Sachkunde sind mindestens 100 dokumentierte Untersuchungen bei einer Mindestzeit von 6 Monaten erforderlich.

Der Strahlenschutzbeauftragte für den Bereich der interventionellen Radiologie und Kardiologie muss die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz besitzen. Die Aufsichtsbehörde sollte von diesem Strahlenschutzbeauftragten die Erstellung einer besonderen Strahlenschutzanweisung für den innerbetrieblichen Ablauf für die interventionelle Radiologie verlangen. Eine innerbetriebliche spezielle Strahlenschutzanweisung sollte entsprechend den technischen Änderungen jeweils modifiziert werden. Bei der Einweisung in jeden interventionellen Arbeitsplatz ist besonders auf die spezielle Gerätetechnik einschließlich der strahlenschutzrelevanten Parameter hinzuweisen; dies ist zu dokumentieren. Bei der Erst- und den jährlichen Folgeunterweisungen ist besonders auf die speziellen Gegebenheiten bei interventionellen Maßnahmen hinzuweisen. Beteiligte Ärzte, MTRAs und sonstiges Personal haben gegen Unterschrift vom Inhalt Kenntnis zu nehmen.

4.1.2 Dosisreferenzwerte

Nach dem heutigen Kenntnisstand eignet sich das Dosisflächenprodukt am ehesten zur Abschätzung der Exposition des Patienten. In Tab. 12 sind für die beiden häufigsten interventionellen Maßnahmen die 3. Quartile für das Dosisflächenprodukt angegeben. Diese Referenzwerte können vorläufig nur als grobe Orientierungswerte dienen, da die erfassten Kollektive klein sind. Sie bedürfen der jährlichen Überprüfung, da Änderungen durch Indikation, Methodik und Technik zu erwarten sind.

Tab. 12: Referenzwerte für die zwei häufigsten interventionellen Maßnahmen [BfS 2003]

Maßnahme	Dosisflächenprodukt in $\text{cGy} \times \text{cm}^2$	DL-Zeit im min
PTA	10.000	18
PTCA	12.000	20

4.2 Technische Anforderungen

Es werden folgende grundsätzliche Forderungen zum baulichen Strahlenschutz gestellt: Die Räume, in denen Röntgengeräte für Interventionen genutzt werden, müssen bezüglich ihrer räumlichen Ausdehnung (Fläche, Höhe) großzügig dimensioniert sein. Das Personal muss sich ungestört von geräte- und strahlenschutztechnischen Einrichtungen innerhalb des Raums bewegen können. Es sollte

bei Errichtung einer derartigen Anlage an die Möglichkeit gedacht werden, auch nachträglich zusätzliche Einrichtungen (z.B. ortsbewegliche Abschirmungen) installieren zu können. Die Rückstreuung von Wänden, Decke und Fußboden sollte möglichst gering gehalten werden. Das kann durch entsprechend große Abstände zwischen der Achse des Nutzstrahlenbündels von Wänden, Decke und Fußboden geschehen ($> 1,5$ m) und/oder durch Belegung dieser Flächen mit einem rückstreuarmen Belag [DIN 6812, 2002]. Zwischen Röntgenraum und Bedienungsraum muss eine Sicht- und Sprechverbindung bestehen. Die Fensterfläche muss so groß gewählt werden, dass mindestens zwei Personen vom Bedienungsraum aus die Vorgänge im Röntgenraum beobachten können.

Bei Interventionen werden Röntgenstrahlen dazu verwendet, die Maßnahme sichtbar zu machen und das Ergebnis zu kontrollieren. Hierbei werden unter anderem arterielle und venöse Gefäße, Gallenwege und sonstige anatomische Strukturen ggf. mit Kontrastmittel, Führungsdrähten, Stents, Markern usw. dargestellt. Da Bildqualität und Dosis miteinander korreliert sind, ist eine Reduktion der Exposition in der Regel nur mit einem Verlust an Bildqualität möglich. Dem Stand der Technik für Röntgenanlagen zur Intervention entsprechen heute ausschließlich digitale Systeme.

Die komplexe Technik dieser Anlagen erlaubt eine große Auswahl sehr individueller Geräte- und Untersuchungsparameter. Dies führt zu einer großen Bandbreite der möglichen Strahlenexposition für Patient und Personal (siehe auch Abb. 4). Der im konventionellen (analogen) Bereich vorhandene enge Zusammenhang zwischen Patientendicke, Strahlenqualität und Bildqualität ist bei digitalen Anlagen nicht mehr gegeben. Eine Optimierung (Minimierung) der Dosis für Patient und Personal kann durch die folgenden Möglichkeiten erreicht werden:

- zeitliche Modulation der Röntgenstrahlung (gepulste Durchleuchtung und Bildspeicherung),
- räumliche Modulation des Röntgenstrahls (halbtransparente Blenden, Keilfilterblenden, Cardblenden, Irisblenden usw.),
- Auswahl verschiedener, vom Hersteller vorprogrammierter Kennlinien (u.a. so genannte Low-Dose-Kennlinien),
- Einsatz von modernen Bildempfängern: hochauflösende, digital arbeitende Bildverstärker-Fernseh-Kette (BV-TV-Kette); dynamisches Flachdetektorsystem auf Halbleiterbasis (DR-System, DR = Direct Radiology),
- Einsatz von modernen Bilderzeugungssystemen: Digitale BV-Radiographie; digitaler Kinomode; Digitale Subtraktions-Angiographie (DSA); Last-Image-Hold (LIH) bzw. Last-Image-Run (LIR),

- Einsatz von modernen Bildwiedergabesystemen: hochauflösender Befundungsmonitor (Bildwiedergabegerät, BWG); Bilddokumentationssystem (BDS),
- Einsatz moderner Filterautomatiken,
- Einsatz von Strahlenschutzmitteln: geeignete Schutzkleidung (Mantelschürze, Schilddrüsenschutz, Bleiglasbrille, flexible Schutzhandschuhe); geräteintegrierter Streustrahlenschutz [SV-RL 2003],
- Einsatz von indirekten Strahlenschutzmitteln: Dosisflächenprodukt-Anzeige; amtliches Personendosimeter (z.B. Filmdosimeter); jederzeit ablesbares Dosimeter (z.B. digitale elektronische Dosimeter), Fingerringdosimeter [RL phys. Ko. 2004],
- beim Einsatz von DR-Systemen anstelle der BV-TV-Kette: Kathetersteuerung durch magnetische Navigation [Jackmann 2004].

Die Strahlenschutzkommission hat Anregungen zu diesen Punkten mit den Vorgaben folgender Organisationen und Gremien verglichen und diskutiert:

- Ärztliche Stellen
- Arbeitskreis RöV (AK RöV)
- Bundesärztekammer (BÄK)
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
- Bundesministerium für Gesundheit (BMG)
- Bundesministerium für Umwelt (BMU)
- Deutsche Gesellschaft für Herz- und Kreislaufforschung (DGHKF)
- Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik (DGMP)
- Deutsche Röntgengesellschaft (DRG)
- Food and Drug Administration (FDA)
- Kassenärztliche Bundesvereinigung (KBV)
- Länderausschuss RöV (LA RöV)
- Landesanstalt für Arbeitsschutz NRW (LafA)
- Normenausschuss Radiologie (NAR)
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI)
- International Commission on Radiological Protection (ICRP)
- Weltgesundheitsorganisation (WHO)
- International Atomic Energy Agency (IAEA).

Die Strahlenschutzkommission geht davon aus, dass die Anforderungen der Richtlinien zur Röntgenverordnung, insbesondere der „Richtlinie für die technische Prüfung von Röntgeneinrichtungen und genehmigungsbedürftigen Störstrahlen – Sachverständigenrichtlinie (SV-RL)“ [SV-RL 2003] und der „Richtlinie zur Durchführung der Qualitätssicherung bei Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung und Behandlung von Menschen nach den §§ 16 und 17 der Röntgenverordnung-Qualitätssicherungsrichtlinie (QS-RL)“ [QS-RL 2003] in der jeweils gültigen Fassung bezüglich der dort genannten technischen Regeln in jedem Fall erfüllt sein müssen.

Zur Verbesserung des Strahlenschutzes hält die Strahlenschutzkommission nach dem derzeitigen Stand der Technik die nachfolgenden technischen Anforderungen je nach Anwendungsart und technischen Möglichkeiten für erforderlich.

4.2.1 Allgemein

Folgende Anforderungen sollten erfüllt werden:

- Raster mit hoher Strahlendurchlässigkeit (Selektivität), das bei Anwendungen an Kindern entfernt werden kann,
- Anzeige des integralen Dosisflächenproduktes und ggf. der Einfalldosis für jede Ebene im Röntgenraum mit Registrierung,
- automatische Aufzeichnung der Anzahl der Aufnahmen je Untersuchung und Projektion,
- Bildmatrix für die digitale Projektionsradiographie und Indirekttechnik mindestens 1.024×1.024 und entsprechend hoch auflösende Bildempfänger-Fernseh-Kette oder DR-Detektor mit Zoom-Möglichkeit (in der Kardiologie ist eine Bildmatrix von 512×512 hinreichend),
- gerätetechnischer Strahlenschutz für das Personal.

Um die Anteile an der Strahlenexposition und damit die Möglichkeiten der Dosisreduktion besser einzuschätzen, sollte das DFP nach Durchleuchtung und Aufnahmen getrennt aufgezeichnet werden.

Details zur Aufzeichnungspflicht nach § 28 RöV sind in der entsprechenden Richtlinie [RL Aufzeichnungspflichten 2006] enthalten. Diese beschäftigt sich u.a. mit den technischen Einstellparametern bei Durchleuchtungsuntersuchungen, mit den aufzuzeichnenden Daten bei der Röntgendurchleuchtung, mit der Ermittlung der Strahlenexposition des Patienten und mit der Datenkommunikation und -archivierung.

4.2.2 Durchleuchtung

Die bisherige Regelung, den Grenzwert für die Dosisleistung am Bildempfängereingang (z.B. am Eingang des Bildverstärkers) festzulegen, sollte zu Gunsten einer Verlegung des Grenzwertes für die Einfalldosisleistung in die Patientenebene aufgegeben werden. Die Einfalldosisleistung bezieht sich auf bestimmte Prüfkörper und muss auch mit diesen bei Anwahl ganz bestimmter Durchleuchtungsparameter bestimmt werden.

Bei der Durchleuchtung sollten folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Verwendung der gepulsten Durchleuchtung mit variabel einstellbaren Pulsfrequenzen oder einer anderen Technik, die zu ähnlichen Dosisreduktionen führt.
- Die kleinste einstellbare Pulsfrequenz sollte $\leq 12,5$ Bilder/s sein.
- Am besten sollte eine Filterautomatik verwendet werden, ansonsten sollten wählbare Zusatzfilter vorhanden sein, die einen Maximalwert für das Cu-Äquivalent von $\geq 0,1$ mm einzustellen gestatten (eine eventuell dadurch bedingte Kontrastminderung darf dabei nicht zu einer Minderung der diagnostischen Aussagekraft führen).
- Im so genannten Normal-Mode muss die maximale Einfalldosisleistung $\leq 0,1$ Gy/min in 30 cm Abstand vom Bildempfänger sein.
- Bei höherer Einfalldosisleistung als $0,1$ Gy/min in 30 cm Abstand vom Bildempfänger („High-Level-Mode“ = HLM) muss eine optische oder akustische Anzeige im Untersuchungsraum vorhanden sein.
- Bei der Wahl der Organprogramme sollte mit der niedrigsten Dosis(leistungs)stufe begonnen werden, wobei es dem Hersteller überlassen bleibt, wie er diese Einstellung realisiert (z.B. über die Dosis pro Bild, die Pulsfrequenz oder eine bestimmte Regelkennlinie).
- Eine Anzeige der Bezeichnungen der vom Anwender gewählten Durchleuchtungskennlinien am Schaltpult sollte möglich sein.
- Für Röntgen-Bildverstärker (BV) mit BV-Nenndurchmesser $d \leq 25$ cm (R_{25}) ist die visuelle Ortsauflösung R des Durchleuchtungsbildes größer gleich 1 Linienpaar pro Millimeter (≥ 1 Lp/mm). Für größere BV-Nenndurchmesser d gilt: $R_d \geq R_{25} \cdot (25/d)$ [SV-RL 2003]. Die Abhängigkeit dieses Grenzwertes für die Ortsauflösung von den Detektormäßen (z. B. vom Durchmesser) gilt nicht für Durchleuchtungsgeräte mit dynamischem Flachdetektorsystem.
- Die elektronische Bildüberlagerung (Overlay)-Katheterführung kann ein Referenzbild oder Road-Mapping sein.

- Ein „Last-Image-Hold“ (LIH) oder bei kardiologischer und elektrophysiologischer Anwendung ein „Last-Image-Run“ (LIR) sollte möglich sein.
- Eine automatische Begrenzung der Einfalldosisleistung bei HLM, unabhängig vom Fokus-Bildverstärker-Abstand (Source-Image-Distance-Tracking = SID-Tracking) muss vorhanden sein.
- Eine strahlungsfreie Einblendung (virtuelle Einblendung) durch gezielte Bedienerführung über die graphische Anzeige der aktuellen Blendenposition in Bezug auf ein Last Image Hold (LIH) der vorausgegangenen Durchleuchtung oder Aufnahme wird empfohlen.
- Ein strahlungsfreies Einführen von Filtern und halbtransparenten Blenden wird empfohlen. Dabei sollte eine gezielte Bedienerführung über eine aussagekräftige Graphik im LIH zur Verfügung stehen.

Die Strahlenschutzkommission empfiehlt, dass eine strahlungslose Kontrolle der Tischverschiebung möglich ist. Dabei sollte die Anzeige der aus Strahlengeometrie und Einblendung gerechneten Position des Strahlenfeldes in Bezug auf das LIH vorhanden sein.

Weiterhin wird für eine Reduzierung der Dosis die Verwendung von Kathetern empfohlen, die einen möglichst hohen Bildkontrast liefern.

4.2.3 Aufnahme

Anforderungen an die Aufnahme sind:

- Maximale Dosis bei Aufnahmebetrieb 2,0 μGy pro Bild, bei Kinobetrieb 0,2 μGy pro Bild und bei Digitaler Subtraktions-Angiographie (DSA) 5 μGy pro Bild, jeweils bezogen auf einen BV-Nenn Durchmesser d von ≤ 25 cm (K_B^{25}). Für größere BV-Nenn Durchmesser d gilt:

$$K_B^d \leq K_B^{25} \cdot (25/d)^2 \text{ [SV-RL 2003]}$$

(diese Regelung gilt nicht für dynamische Flachdetektorsysteme).

- Nennwert der kürzesten Schaltzeit ≤ 5 ms,
- Last-Image-Run (LIR),
- automatische Aufzeichnung der Anzahl der Aufnahmen zu jedem Patienten,
- manuelle oder automatische Umschaltmöglichkeit der Bildfrequenz während einer Aufnahmeserie, optimal mit einer expliziten Vorgabe der Bildfrequenzen in den entsprechenden Organprogrammen.

4.3 Strahlenschutz des Personals

Wie in Kapitel 3 dargestellt, würden die Grenzwerte für das strahlenexponierte Personal ohne gerätezugeordneten bzw. persönlichen Strahlenschutz überschritten (s. Tab. 11). Wie verschiedene Arbeiten gezeigt haben [Miller and Castronovo 1985, Sievert et al. 1987, Prachar et al. 1989, Pratt and Shaw 1993], ist dies mit gerätezugeordnetem Strahlenschutz in Verbindung mit Bleigummischürzen mit einem Bleigleichwert von nur 0,25 mm zu verhindern. Damit wird zusätzlich das aus physiologischen Gründen gegebene Ziel, die körperliche Belastung des Personals durch die zu tragende persönliche Schutzausrüstung zu verringern, erreicht.

Das Personal ist nach § 31 Abs. 1 RöV der Kategorie A für beruflich strahlenexponierte Personen zuzuordnen. Damit sind nach § 37 Abs. 1 und 2 RöV regelmäßig die arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen durchzuführen.

Die Strahlenexposition des Personals kann prinzipiell durch

- anlagenbezogenen Strahlenschutz (direkter und indirekter Streustrahlenschutz),
 - persönlichen Strahlenschutz (Bleigummischürzen, Schilddrüsenschutz, Bleiglasbrillen),
 - Minimierung der Untersuchungszeit,
 - Vergrößerung des Abstandes zur Strahlenquelle, z.B. durch fernbediente Injektoren und Wahl eines geeigneten Zugangs, und
 - geeignete Position bei der Katheterisierung
- verringert werden.

In der Praxis sind Bleiglas-(Plexiglas-)Scheiben und Bleivorhänge nur schwer nachträglich zu montieren. Es hat sich gezeigt, dass Nachrüstungen häufig ungeeignet sind und deshalb nicht verwendet werden können.

DFP-normierte Ortsdosiswerte in Untersucherposition [$\text{nSv}/(\text{Gy}\cdot\text{cm}^2)$] ermöglichen eine verlässliche Bewertung der Effektivität und/oder Akzeptanz von Strahlenschutzvorrichtungen sowie, im Falle vergleichbarer Untersuchungsbedingungen, eine Abschätzung der Untersucher-Ortsdosis aus dem applizierten DFP.

Die individuellen Schutzmaßnahmen sollten neben der Bleischürze auch eine lateral schützende Bleibrille, einen Schilddrüsenschutz mit jeweils 0,5-mm-Pb-Äquivalent sowie einen Fußschalterschutz von 1,0-mm-Pb-Äquivalent umfassen. Im Einzelfall können weitere Schutzmaßnahmen sinnvoll sein, wie z.B.

bleiäquivalente Abdeckungen an der Punktionsstelle sowie Helme mit 0,5-mm-Pb-Äquivalent. Der Durchleuchtungsmonitor ist aus Sicht des Untersuchers in einem großen Winkel zum Strahlengang zu positionieren, um die Gesichts- und Augenregion des Untersuchers zu schützen [MARTIR 2002].

Im Sinne des Strahlenschutzes des Personals ist weiterhin zu fordern, dass

- bei den interventionellen Arbeitsplätzen ein geeigneter, anlagenbezogener Streustrahlenschutz im Lieferumfang des Geräteherstellers enthalten sein muss. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die konstruktiven Überlegungen vom Nutzer auf den Hersteller übertragen und damit realisierbar werden. Zur Orientierung des Nutzers sind Isodosenangaben für die verschiedenen Positionen des Gerätes notwendig. Isodosenkurven für die wichtigsten Einstrahlrichtungen müssen Bestandteil der Begleitpapiere für interventionelle Arbeitsplätze sein. Exemplarische Messungen hierzu sind in der Literatur zu finden [IEC 2000-06, Marx and Balter 1995].
- C-Bogen-Geräte, wenn möglich, als Untertischanlagen zu betreiben sind. Hände und Kopf des Arztes werden dabei wesentlich weniger exponiert als bei obenstehender Röhre. Bei der Einweisung sollten deshalb bei C-Bogen-Anlagen Strahler und Bildverstärker kenntlich gemacht werden.

Die Arbeitsbedingungen sind so zu gestalten, dass die Grenzwerte nach Röntgenverordnung (§ 31a RöV), insbesondere die an den Händen, der Augenlinse und der Schilddrüse, nicht überschritten werden. Ist nicht auszuschließen, dass in einem Kalenderjahr die Organdosis der Hände 150 mSv, die der Augenlinse 45 mSv überschreitet, ist eine Messung der Teilkörperdosen an diesen Körperteilen vorgeschrieben (§ 35 Abs. 5 RöV). Nach Aussagen von Hygienikern [Lüttiken 1996] stehen dafür auch geeignete sterilisierbare Dosimeter zur Verfügung. Die Dosimeter sind dabei so zu sterilisieren, dass sie der hygienischen Situation der Hände des Untersuchers entsprechen. Hierzu ist z.B. das Einlegen in eine flüssige Sterilisierungslösung ausreichend.

4.3.1 Besonderheiten der Kardiologie

Eine Linksherzkatheterisierung erfordert in der Regel 1 Laevokardiographie-sequenz, 3 LCA- und 2 RCA-Projektionen, die je nach Anatomie und Befund durch 1 bis 4 variable Spezialprojektionen, eingeblendet auf „Region of Interest“ (ROI), ergänzt werden. PA-Projektionen und stärker angulierte RAO-Angulationen $\geq 40^\circ$ – bisher unüblich in der invasiven Kardiologie – sind aus strahlenhygienischen Gründen ausgeprägten LAO-Projektionen grundsätzlich vorzuziehen. Die Untersucherexposition erhöht sich im Falle derartiger LAO-

Projektionen nicht proportional zur gesteigerten Patientenexposition [Kuon et al. 2004b].

5 Empfehlungen

Zur Optimierung des Strahlenschutzes von Patient und Personal bei interventionellen radiologischen Maßnahmen gibt die Strahlenschutzkommission folgende Empfehlungen:

1. Bei allen interventionellen radiologischen Maßnahmen hat die Indikationsstellung und die Abwägung alternativer Maßnahmen mit besonderer Sorgfalt zu erfolgen. Bei der Stellung der rechtfertigenden Indikation kommt dem Dialog zwischen dem anfordernden und dem durchführenden Arzt eine besondere Bedeutung zu. Dabei kann die Orientierungshilfe für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen [SSK 2006] von Nutzen sein.
2. Die Anzahl radiographischer Bilder und Serien, die Durchleuchtungsdauer, die Bildempfängereingangsdosis und die einzublendende „Region of Interest“ sind auf das für die Diagnose notwendige Maß zu beschränken, wobei alle zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten zu nutzen sind, um die Dosis so gering wie möglich zu halten. Wegen der höheren Strahlenempfindlichkeit von Kindern und Jugendlichen sind die Anforderungen an den Strahlenschutz der Patienten in der Kinderkardiologie besonders streng zu stellen.
3. Röntgeneinrichtungen für die interventionelle Radiologie müssen hinsichtlich Bildfrequenz, Einblendung, Intensitätskontrolle, Bilddetektor sowie direkten und individuellen Strahlenschutzmitteln festgelegten technischen Anforderungen entsprechen. Diese sind in Kapitel 4.2 aufgeführt.
4. Die Registrierung der Strahlenexposition des Patienten sollte folgende Parameter umfassen: Dosisflächenprodukt (DFP), getrennt für Durchleuchtung (DFP^F) und radiographische Dokumentation (DFP^R), Anzahl radiographischer Serien und Bilder sowie Durchleuchtungszeit. Hieraus ableitbar sind DFP^F/s und $DFP^R/Bild$: Parameter, die in klinischer Routine eine zu hohe Pulsfrequenz und damit redundantes Bildmaterial aufdecken und im Falle konstanter Bildempfängereingangsdosis das Maß der Einblendung charakterisieren. Aufnahmen zur Ergebnisdokumentation interventioneller Maßnahmen sind auf ein medizinisch notwendiges Minimum zu begrenzen. Dabei ist dem Strahlenschutz Rechnung zu tragen. Die Strahlenschutz-

kommission verweist zur Dokumentation digitaler Daten auf die Richtlinie zu den Aufzeichnungspflichten [RL Aufzeichnungspflichten 2006].

5. Im Interesse des Strahlenschutzes des Patienten und des Personals ist eine ausführliche Einweisung am Gerät durch den Hersteller erforderlich. Das Gerät muss vom Hersteller und ggf. nach den Angaben des Anwenders für den beabsichtigten Einsatz so parametrisiert werden, dass die Erfordernisse des Strahlenschutzes in den Standardeinstellungen berücksichtigt sind und ggf. nicht benötigte Einstellungen gesperrt werden.
6. Die Strahlenschutzkommission empfiehlt, über die bestehenden Regelungen hinaus auch SOP's für seltene Untersuchungen zu erstellen. Arbeitsanweisungen (SOP's - Standard Operating Procedures) sind eine Notwendigkeit, die sich wie die Überweiskriterien ebenfalls aus der nationalen Umsetzung der Richtlinie EU 97/43 EURATOM [EU 1997] sowie der RöV ergibt. SOP's müssen zur Optimierung des Strahlenschutzes für häufig durchgeführte Standarduntersuchungen und auch Standardinterventionen erstellt werden. Diese sind bei der regelmäßigen Überprüfung den Ärztlichen Stellen [ÄSt 2004] vorzulegen. SOP's sind immer spezifisch für eine bestimmte Arbeitsumgebung (Praxis, Krankenhaus) und für einen oder mehrere identische Röntgenarbeitsplätze zu erstellen. Sie müssen neben der Festlegung des Untersuchungsablaufs einer Intervention insbesondere die für die Strahlenexposition wichtigen technischen Parameter, wie z.B. kV, mAs, Filterung, Abstand, Projektionsrichtung, Bildfrequenz, Pulsfrequenz bei Durchleuchtung und Anwendung von Strahlenschutzhilfsmitteln, enthalten.
7. In Anbetracht der hohen Anforderungen an den anwendenden Arzt ist der Erwerb einer speziellen Fachkunde im Rahmen des Spezialkurses für interventionelle Radiologie nach der Fachkunderichtlinie [FK-RL 2006] erforderlich (s. Kap. 4.1.1).
8. Die Strahlenschutzkommission hält weiterhin aufgrund der potentiell hohen Strahlenexposition der Patienten die Beachtung der diagnostischen Referenzwerte für interventionelle Eingriffe für unumgänglich. Zusätzlich wird vom Anwender die Erstellung optimierter Dosiswerte empfohlen, um den aktuellen Stand der Technik und die Arbeitsweise darzulegen. Diese meist unterhalb der Referenzwerte liegenden Werte sollten in den SOP's dokumentiert sein. Hierzu sollten von den Herstellern entsprechende Schnittstellen an den Geräten mit einer zur Dokumentation, Übertragung und Auswertung der Dosisparameter geeigneten Software zur Verfügung gestellt werden.

9. Die Strahlenexposition des Personals sollte durch anlagenbezogene und persönliche Strahlenschutzmittel, Wahl des Standortes des Personals, fernbediente Instrumente und minimale Durchleuchtungszeiten reduziert werden.
10. Der Strahlenschutz des Personals ist durch Festinstallation geeigneter gerätebezogener Strahlenschutzeinrichtungen durch die Hersteller zu optimieren; dies dient zugleich der Herabsetzung der körperlichen Belastung des Personals durch die Verringerung des Gewichtes der Schutzkleidung.
11. Die Strahlenschutzkommission weist darauf hin, dass die Einhaltung der Grenzwerte für die Hände des Personals durch das Tragen von Fingerringdosimetern entsprechend der gesetzlichen Bestimmungen nachzuweisen ist. Besonders bei Einführung neuer Verfahren oder Veränderungen des Arbeitsablaufes sollten zusätzlich Teilkörperdosen an Händen, Kopf und Hals zum Nachweis der Hand-, Augen- bzw. Schilddrüsenexposition gemessen werden.
12. Zur Optimierung der Arbeitsabläufe oder bei der Einführung neuer Techniken ist das Personal zu schulen. Dabei sollten elektronische Dosimeter zur Direktanzeige verwendet werden.

6 Abkürzungsverzeichnis

AGIR	Arbeitsgemeinschaft Interventionelle Radiologie
AVM	Arteriovenöse Malformation
BV-TV-Kette	Bildverstärker-Fernseh-Kette
CT	Computertomographie Computertomograph
DFP	Dosis-Flächen-Produkt
DSA	Digitale Subtraktions-Angiographie
HLM	High-Level-Mode
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
LAO-Projektion	Left-Anterior-Oblique-Projektion
LCA-Projektion	Left-Coronary-Oblique-Projektion
LIH	Last-Image-Hold
LIR	Last-Image-Run
MARTIR	Multimedia and Audiovisual Radiationprotection Training in Interventional Radiology
PA-Projektion	Posterior-Anterior-Projektion
PTA	Perkutane transluminale Angioplastie
PTCA	Perkutane transluminale Coronar-Angioplastie
RAO-Projektion	Right-Anterior-Oblique-Projektion
RCA-Projektion	Right-Coronary-Oblique-Projektion
SOP's	Standard Operating Procedures
TIPSS	Transjugulärer Intrahepatischer Porto-systemischer Stent- Shunt
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

7 Literaturverzeichnis

Verordnungen und Richtlinien

- [EU 1997] Richtlinie 97/43/EURATOM des Rates vom 30. Juni 1997 über den Gesundheitsschutz von Personen gegen die Gefahren ionisierender Strahlung bei medizinischer Exposition und zur Aufhebung der Richtlinie 84/46/EURATOM: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 180; 40. Jahrgang, 9. Juli 1997
- [RöV 2003] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung – RöV) vom 8. Januar 1987 (BGBl. I S. 114) in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2003 (BGBl. I S. 604)
- [QS-RL 2003] Richtlinie zur Durchführung der Qualitätssicherung bei Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung und Behandlung von Menschen nach den §§ 16 und 17 der Röntgenverordnung – Qualitätssicherungsrichtlinie (QS-RL) – vom 20. November 2003, zuletzt geändert durch Rundschreiben vom 11. Mai 2007 (GMBI 2007 S. 703)
- [SV-RL 2003] Richtlinie für die technische Prüfung von Röntgeneinrichtungen und genehmigungsbedürftigen Störstrahlern – Richtlinie für Sachverständigenprüfungen nach der Röntgenverordnung (SV-RL) – vom 27. August 2003 (GMBI S. 783), zuletzt geändert durch Rundschreiben vom 11. Mai 2007 (GMBI 2007 S. 703)
- [ÄSt 2004] Ärztliche und zahnärztliche Stellen – Richtlinie zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und zur Röntgenverordnung (RöV) – RdSchr. BMU v. 18.12.2003 (GMBI 2004 S. 258)
- [RL phys. Ko. 2004] Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil 1: Ermittlung der Körperdosis bei äußerer Strahlenexposition (§§ 40,41,42 StrlSchV; § 35 RöV), (GMBI 2004 S. 410)
- [FK-RL 2006] Richtlinie „Fachkunde und Kenntnisse im Strahlenschutz bei dem Betrieb von Röntgeneinrichtungen in der Medizin oder Zahnmedizin“ – Richtlinie zur Röntgenverordnung vom 22. Dezember 2005 (GMBI 2006 S. 414)
- [RL Aufzeichnungspflichten 2006] Richtlinie zu Aufzeichnungspflichten nach den §§ 18, 27, 28 und 36 der Röntgenverordnung und Bekanntmachung zum Röntgenpass (GMBI 2006 S. 1051)
- [DIN 6812, 2002] DIN 6812: Medizinische Röntgenanlagen bis 300 kV – Regeln für die Auslegung des baulichen Strahlenschutzes. Berlin: Beuth Verlag, Juni 2002

Zitierte Literatur

- [AGIR 2003] Arbeitsgemeinschaft Interventionelle Radiologie: Statistik der Interventionsdaten des Jahres 2003, <http://www.drg-agir.de/AGIRAuswertung2003.pdf>
- [Arthur et al. 2002] Arthur DW, Dhawan J, Norell MS, Hunter AJ, Clark AL: Does cardiologist- or radiographer-operated fluoroscopy and image acquisition influence optimization of patient radiation exposure during routine coronary angiography? *Br J Radiol* 75: 748-755; 2002
- [Ärztezeitung 1993] Das Röntgen-Risiko wird offenbar unterschätzt. *Ärztezeitung* 75/4 vom 25.04.1993
- [Ärztezeitung 1995] Bei Eingriffen unter Röntgenkontrolle oft überhöhte Dosis. *Ärztezeitung* 107/ 8 vom 13.06.1995
- [Barchert et al. 2005] Barchert K, Bogaert E, Lapere R, de Wolf D, Thierens H: Patient-specific dose and radiation risk estimation in pediatric cardiac catheterization. *Circulation* 111: 83-89; 2005
- [Bergeron et al. 1994] Bergeron P, Carrier R, Roy D, Blais N, Raymond J: Radiation Dose to Patients in Neurointerventional Procedures. *AJNR* 15: 1809-1812; 1994
- [Bernardi et al. 2000] Bernardi G, Padovani R, Morocutti G, Vanó E, Malisan MR, Rinuncini M, Spedicato L, Fioretti PM: Clinical and technical determinants of the complexity of percutaneous transluminal coronary angioplasty procedures: analysis in relation to radiation exposure parameters. *Cathet Cardiovasc Interv* 51: 1-9; 2000
- [Berthelsen and Cederblad 1991] Berthelsen B, Cederblad A: Radiation Doses to Patients and Personnel Involved in Embolization of Intracerebral Arteriovenous Malformations. *Acta Radiologica* 32, Fasc. 6: 492-497; 1991
- [Betsou et al. 1998] Betsou S, Efstathopoulos EP, Katritsis D, Faulkner K, Panayiotakis G: Patient radiation doses during cardiac catheterization procedures. *Br J Radiol* 71: 634-639; 1998
- [BfS 2003] Bundesamt für Strahlenschutz: Bekanntmachung der diagnostischen Referenzwerte für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen, 2003 <http://www.bfs.de/ion/medizin/referenzwerte.html>
- [Chopp et al. 1980] Chopp M, Portnoy HD, Schurig R, Croisaant P: Clinical Dosimetry During Cerebral Arteriography. *Neuroradiology* 20: 79-81; 1980

- [Clark et al. 2000] Clark AL, Brennan AG, Robertson LJ, McArthur JD: Factors affecting patient radiation exposure during routine coronary angiography in a tertiary referral centre. *Br J Radiol* 73: 184-189; 2000
- [Cusma et al. 1999] Cusma JT, Bell MR, Wondrow MA, Taubel JP, Holmes DR Jr.: Real-time measurement of radiation exposure to patients during coronary angiography and percutaneous coronary interventional procedures. *J Am Coll Cardiol* 33: 427-435; 1999
- [Delichas et al. 2003] Delichas MG, Psarrakos K, Molyvda-Athanassopoulou E, Giannoglou G, Hatzioannou K, Papanastassiou E: Radiation doses to patients undergoing coronary angiography and percutaneous transluminal coronary angioplasty. *Radiat Prot Dosim* 103: 149-154; 2003
- [Den Boer et al. 2001] Den Boer A, de Feijter PJ, Serruys PW, Roelandt Jr.: Real-time quantification and display of skin radiation during coronary angiography and intervention. *Circulation* 104: 1779-1784; 2001
- [Eder 1995] Eder H: Verbesserung des Untersucherstrahlenschutzes in der Angiographie und der interventionellen Radiologie durch Verwendung von Dauereinrichtungen nach § 21 RöV. *Radiologe* 35: 156-161; 1995
- [Efstathopoulos et al. 2003] Efstathopoulos EP, Makrygiannis SS, Kottou S, Karvouni E, Korovesis S, Tzanalaridou E, Raptou PD, Katritsis DG: Medical personnel and patient dosimetry during coronary angiography and intervention. *Phys Med Biol* 48: 3059-3068; 2003
- [EU 1993] Europäische Union: Vorhaben Nr. F13PCT930070
- [FDA 1992] Food and Drug Administration: FDA Draws Attention to Concerns About Radiation Risk from Fluoroscopy. *Radiological Health Bulletin* 8, No. 8; 1992
- [FDA 1994] Food and Drug Administration: Avoidance of Serious X-Ray-Induced Skin Injuries to Patients during Fluoroscopically-Guided Procedures. 09.09.1994
- [Feygelman et al. 1992] Feygelman VM, Huda W, Peters KR: Effective Dose Equivalents to Patients undergoing Cerebral Angiography. *Am. Journal Neuroradiology* 13: 845-849; 1992
- [Fischer et al. 1995] Fischer H, Przetak C, Teubert G, Ewen K, Mödder U: Die Strahlenexposition des Radiologen bei Angiographien: Dosismessungen außerhalb der Bleischürze. *Fortschritt Röntgenstrahlen* 162/2: 152-156; 1995

- [Fitousi et al. 2006] Fitousi NT, Efstathopoulos EP, Delis HB, Kottou S, Kelekis AD, Panayiotakis GS: Patient and staff dosimetry in vertebroplasty. *Spine* 31:884-890; 2006
- [Fransson and Persliden 2000] Fransson SG, Persliden J: Patient radiation exposure during coronary angiography and intervention. *Acta Radiol* 41: 142-144; 2000
- [Giacomuzzi und Erckert 1995] Giacomuzzi SM, Erckert B: Exposition des Untersuchungspersonals bei Angiographie und interventioneller Radiologie. *Strahlenschutz* 3/2: 28-33; 1995
- [Habermaas 1995] Habermaas I: Strahlenbelastung von Patient und Arzt bei interventionellen neurologischen Maßnahmen am Kopf. *Strahlenschutz* 3/2: 18-27; 1995
- [Hart et al. 1994] Hart D, Jones DG, Wall BF: Estimation of Effective Dose in Diagnostic Radiology from Entrance Surface Dose and Dose-Area Product Measurements. *NRPB-R 262*, April 1994
- [Hirshfeld et al. 2004] Hirshfeld JW, Balter SB, Brinker JA, Kern MJ, Klein LW, Lindsay BD, Tommaso CL, Tracy CM, Wagner LK: ACCF/AHA/HRS/SCAI clinical competence statement on physician knowledge to optimize patient safety and image quality in fluoroscopically guided invasive cardiovascular procedures. A report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association/American College of Physicians Task Force on Clinical Competence and Training. *J Am Coll Cardiol* 44(11): 2259-2282; 2004
- [Hjadat et al. 1996] Hjadat N, Biamino G, Michel L, Wust P, Panzer W, Zankl M, Felix R: Strahlenexposition in der interventionellen Radiologie am Beispiel der Chemoembolisation des hepatozellulären Carzinoms und der Laserangioplastie der Beckenarterien. *Fortschr. Röntgenstr.* 164/3: 249-256; 1996
- [Huda and Peters 1994] Huda W, Peters KR: Radiation-Induced Temporary Epilation After a Neuroradiologically Guided Embolization Procedure. *Radiology* 193/3: 642-644; 1994
- [IAEA 2005] International Atomic Energy Agency: IAEA Training Material on Radiation Protection in Diagnostic and Interventional Radiology and on Radiation Protection in Cardiology, Version January 2005
- [ICRP 1990] Internationale Strahlenschutzkommission ICRP: Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission 1990. ICRP Veröffentlichung 60, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1993
- [ICRP 2007] Internationale Strahlenschutzkommission ICRP: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, *Annals of the ICRP*, Vol. 37/2-4; 2007

- [IEC 2000-06] International Electrotechnical Commission: Particular requirements for the safety of X-ray equipment for interventional procedures. IEC 60601-2-43 (Ed.1.0) 2000-06
- [Jackman 2004] Jackman WM: Magnetische Navigation, Medical Solution, S. 42; Juli 2004
- [Kallmes et al. 2003] Kallmes DF et al.: Radiation dose to the operator during vertebroplasty: prospective comparison of the use of 1-cc syringes versus an injection device. *AJNR Am J Neuroradiol* 24(6):1257-60; 2003
- [Katritsis et al. 2000] Katritsis D, Efsthopoulos E, Betsou S, Korovesis S, Faulkner K, Panayiotakis G, Webb-Peploe MM: Radiation exposure of patients and coronary arteries in the stent area: a prospective study. *Cathet Cardiovasc Intervent* 51: 259-264; 2000
- [Katzen 1993] Katzen, BT: Die Entwicklung der interventionellen Medizin. *Kontraste* 3: 18-28; 1993
- [Komemushi et al. 2005] Komemushi A et al.: Radiation exposure to operators during vertebroplasty. *JVIR, Journal of Vascular and Interventional Radiology* 16: 1327-1332; 2005
- [Kuon et al. 2004a] Kuon E, Empen K, Rohde D, Dahm JB: Radiation exposure to patients undergoing percutaneous coronary interventions – Are current reference levels too high? *Herz* 29: 208-217; 2004
- [Kuon et al. 2004b] Kuon E, Dahm JB, Empen K, Robinson DM, Reuter G, Wucherer M: Less irradiating angulations in invasive cardiology. *J Am Coll Cardiol* 44: 1420-1428; 2004
- [Kuon et al. 2005a] Kuon E, Dahm JB, Robinson DM, Empen K, Günther M, Wucherer M: Radiation-reducing planning of cardiac catheterisation. *Z Kardiol* 94(10): 663-673; 2005
- [Kuon et al. 2005b] Kuon E, Robinson DM, Dahm JB: Fluoroscopy time – an overestimated factor for patient radiation exposure in invasive cardiology. *Fortschr Röntgenstr* 177: 812-817; 2005
- [Larrazet et al. 2003] Larrazet F, Dibie A, Philippe F, Palau R, Klausz R, Laborde F: Factors influencing fluoroscopy time and dose-area product values during ad hoc one-vessel percutaneous coronary angioplasty. *Br J Radiol* 76: 473-477; 2003
- [Lobotessi et al. 2001] Lobotessi H, Karoussou A, Neofotistou V, Louisi A, Tsapaki V.: Effective dose to a patient undergoing coronary angiography. *Radiat Prot Dosim* 94: 173-176; 2001

- [Lüttiken 1996] Lüttiken R (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Zentralbereich für Krankenhaushygiene): Desinfektion von Fingerringdosimetern im OP-Bereich, persönliche Mitteilung vom 8.3.1996
- [Marshall et al. 1995] Marshall NW, Noble J, Faulkner K: Patient and staff dosimetry in neuroradiological procedures. *Br J Radiol* 68 (809): 495-501; 1995
- [MARTIR 2002] MARTIR (Multimedia and Audiovisual Radiation Protection Training in Interventional Radiology). CD-ROM. Radiation Protection 119, European Commission. Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. Luxembourg, 2002 (Publication Department of the European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg: env-radprot@cec.eu.int)
- [Marx and Balter 1995] Marx DL, Balter S: The Distribution of Stray Radiation in a Cardiac Catheterization Laboratory. Presented at the joint annual meeting of: American Association of Physicists in Medicine Health Physics Society, Boston July 1995
- [Mehdizade et al. 2004] Mehdizade A et al. : Radiation dose in vertebroplasty. *Neuroradiology* 46: 243-245; 2004
- [Meier et al. 1995] Meier N, Lenzen H, Sudhoff A, Fiebich M, Kötter L: Exposition des Personals bei interventioneller Radiologie. *Radiologe* 35: 152-155; 1995
- [Miller and Castronovo 1985] Miller SW, Castronovo FP: Radiation Exposure and Protection in Cardiac Catheterization Laboratories. *American Journal of Cardiology* 55: 171-176; 1985
- [Mini und Schneeberger 1995] Mini R, Schneeberger P: Automatische Erfassung und Analyse des Dosis-Flächen-Produktes (DFP). Tagungsband der 26. Tagung der DGMP in Würzburg, 110-123; 1995
- [Molyneux et al. 2002] Molyneux A et al.: *Lancet* 360: 1267-1274; 2002
- [Molyneux et al. 2005] Molyneux A et al.: *Lancet* 366: 809-817; 2005
- [Mooney et al. 2000] Mooney RB, McKinstry CS, Kamel HAM: Absorbed dose and deterministic effects to patients from interventional neuroradiology. *The British Journal of Radiology* 73: 745-751; 2000
- [Neofotistou et al. 2003] Neofotistou V, Vanó E, Padovani R, Kotre J, Dowling A, Toivonen M, Kottou S, Tsapaki V, Willis S, Bernardi G, Faulkner K: Preliminary reference levels in interventional cardiology. *Eur Radiol* 13: 2259-2263; 2003

- [Norbash et al. 1996] Norbash AM, Busick D, Marks MP: Techniques for Reducing Interventional Neuroradiologic Skin Dose: Tube Position Rotation and Supplemental Beam Filtration. *Am J Neuroradiol* 17: 41-49; 1996
- [O'Dea et al. 1999] O'Dea TJ, Geise RA, Ritenour ER: The potential for radiation-induced skin damage in interventional neuroradiological procedures: a review of 522 cases using automated dosimetry. *Med Phys* 26 (9): 2027-33; 1999
- [Ortiz et al. 2006] Ortiz AO, Natarajan V, Gregorius DR, Pollack S: Significantly reduced radiation exposure to operators during kyphoplasty and vertebroplasty procedures: methods and techniques. *AJNR Am J Neuroradiol.* 27:989-994; 2006
- [Payne 1994] Payne TJ: RSNA Refresher Course # 521, Nov. 30, 1994
- [Perisinakis et al. 2004] Perisinakis K et al.: Patient exposure and associated radiation risks from fluoroscopically guided vertebroplasty or kyphoplasty. *Radiology* 232:701-707; 2004
- [Prachar et al. 1989] Prachar H, Dittel M, Kallinger W, Kundtner M, Enenkel W: Reduktion der Strahlenbelastung durch Schutzeinrichtungen bei Herzkatheteruntersuchung und interventioneller Kardiologie. *Zeitschrift Kardiologie* 78: 271-275; 1989
- [Pratt and Shaw 1993] Pratt TA, Shaw AJ: Factors affecting the radiation dose to the lens of the eye during cardiac catheterization procedures. *The British Journal of Radiology* 66: 346-350; 1993
- [Renaud 1992] Renaud L: A 5-Year Follow-Up of the Radiation Exposure to In-Room Personel During Cardiac Catheterization. *Health Physics* 62: 10-15; 1992
- [Schmidt und Stieve 1996] Schmidt Th, Stieve F-E: Digitale Bildgebung in der Diagnostischen Radiologie, Bildqualität-Strahlenexposition. Tagungsband, 1. Auflage, Berlin: H. Hoffmann-Verlag, Juni 1996
- [Schueler et al. 2005] Schueler BA et al.: 3D cerebral angiography: radiation dose comparison with digital subtraction angiography. *AJNR Am J Neuroradiol* 26:1898-1901; 2005
- [SCIR 1994] Society of Cardiovascular & Interventional Radiology: Interventional Radiology Perspective on the Food and Drug Administration Warning on Fluoroscopy, 07.10.1994
- [Seifert et al. 2000] Seifert H, El-Jamal A, Roth R, Urbanczyk K, Kramann B: Reduzierung der Strahlenexposition von Patienten bei ausgewählten interventionellen und angiographischen Maßnahmen. *Röfo*, 172 (12): 1057-64; 2000

- [Sievert et al. 1987] Sievert H, Manegold K, Lie K, Jorda S, Kober G, Kaltenbach M: Strahlenbelastung bei Herzkatheteruntersuchungen - Bedeutung von Maßnahmen zur Reduktion der Streustrahlung. Zeitschrift Kardiologie 76: 326-328; 1987
- [SSK 2006] Strahlenschutzkommission: Orientierungshilfe für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 51 (2006), H. Hoffmann Verlag, Berlin, ISBN 3-87344-130-6
- [SSK 2007] Strahlenschutzkommission: Der Strahlenunfall – Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission (SSK), Band 32, 2. Auflage (in Vorbereitung), herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- [Stargard und Alzen 1994] Stargard A, Alzen G: Zur Strahlenschutzsituation bei angiographischen Untersuchungen. Zeitschrift Medizinische Physik 2: 42-46; 1992
- [Statistisches Bundesamt 2007] Durchschnittsalter der Bevölkerung am 31.12.2003 in Deutschland, Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2007
- [Struelens et al. 2005] Struelens L et al.: Skin dose measurements on patients for diagnostic and interventional neuroradiology: a multicentre study. Radiation Protection Dosimetry 114: 143-146; 2005
- [Theodorakou and Horrocks 2003] Theodorakou C, Horrocks JA: A study on radiation doses and irradiated areas in cerebral embolisation. The British Journal of Radiology 76: 546-552; 2003
- [Tryhus et al. 1987] Tryhus M, Mettler FA, Kelsey C: The Radiologist and Angiographic Procedures: Absorbed Radiation Dose. Invest. Radiol. 22: 747-750; 1987
- [UNSCEAR 1993] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR: Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR, 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: United Nations; 1993
- [UNSCEAR 2007] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR: Sources of radiation and effects of exposure, A/AC.82/R.668, Fifty-fifth session, Vienna, 21-25 May 2007

- [Van Buuren et al. 2005] Van Buuren E, Mannebach H, Horstkotte D: 20. Bericht über die Leistungszahlen der Herzkatheterlabore in der Bundesrepublik Deutschland. Ergebnisse einer gemeinsamen Umfrage der Kommission für Klinische Kardiologie und der Arbeitsgruppen Interventionelle Kardiologie (für die ESC) und Angiologie der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung über das Jahr 2003. *Z Kardiol* 94: 212-215; 2005
- [Van de Putte et al. 2000] Van de Putte S, Verhaegen F, Taeymans Y, Thierens H: Correlation of patient skin doses in cardiac interventional radiology with dose-area product. *Br J Radiol* 7: 504-513; 2000
- [Vehmas 1993] Vehmas T: What Factor Influence Radiologists' Finger Doses During Percutaneous Drainages Under Fluoroscopic Guidance? *Health Physics* 65/2: 161-163; 1993
- [Wagner et al. 1994] Wagner LK, Eifel PJ, Geise RA: Potential Biological Effects Following High X-Ray Dose Interventional Procedures. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* 5/1: 71-84; 1994
- [Wagner 1995] Wagner LK: Biologic Effects of High X-Ray Doses. *RSNA Publication*, November 26 - December 1, 1995: 167-170
- [WHO 1995] WHO: Gemeinsamer Workshop der Weltgesundheitsorganisation und des Instituts für Strahlenhygiene über Wirksamkeit und Strahlenschutz in der interventionellen Radiologie. Neuherberg, 6.-10. Oktober 1995
- [Wolff und Heinrich 1993] Wolff D, Heinrich KW: Strahlenschäden der Haut nach Herzkatheterdiagnostik und -therapie - 2 Kasuistiken. *Hautnah Dermatologie* 5: 450-452; 1993
- [Worgul et al. 2007] Worgul BV, Kundiyevev YI, Sergiyenko NM, Chumak VV, Vitte PM, Medvedovsky C, Bakhanova EV, Junk AK, Kyrychenko OY, Musijachenko NV, Shylo SA, Vitte OP, Xu S, Xue X and Shore RE: Cataracts among Chernobyl Clean-up Workers: Implications Regarding Permissible Eye Exposures. *Radiat. Res.* 167: 233-243; 2007
- [Wucherer und Schmidt 1995] Wucherer M, Schmidt Th: Patient and staff dose measurements of DSA. *Tagungsband der 26. Tagung der DGMP in Würzburg*: 140-141; 1995
- [Zeitler und Schmidt 1987] Zeitler E, Schmidt Th: *Strahlenexposition bei der digitalen Subtraktionsangiographie*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1987