

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Medizinisches Versorgungszentrum

Prof. Mathey und Prof. Schofer

Titel der Dissertation

**Strahlenexposition des Untersuchers bei
katheterinterventionellen Eingriffen an den Koronararterien und
den peripheren Gefäßen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von:

Naser Ahmeti
geboren in Preshevo, Serbien

Hamburg 2016

**Angenommen von der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg
am: 18.07.2016**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. med. Detlef Mathey

Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in: PD. Dr. med. Andreas Krüll

**Prüfungsausschuss, dritte/r Gutachter/in: PD. Dr. med. Renate Bonin-
Schnabel**

Stellv. Mitglied: Prof. Dr. Joachim Schofer

Teile dieser Arbeit wurden vorab publiziert

Physicians' Radiation Exposure in the Catheterization Lab

Does the Type of Procedure Matter?

Maja Ingwersen, DVM; Anna Drabik, PhD; Ulrike Kulka, PhD; Ursula Oestreicher, Dipl Biol; Simon Fricke, BS; Hans Krankenberg, MD; Carsten Schwencke, MD; Detlef Mathey, MD

J Am Coll Cardiol Interv. 2013; 6(10):1095-1102

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	8
1.1	Strahlenexposition bei katheterinterventionellen Eingriffen an den Herzkranzarterien und peripheren Gefäßen	8
1.2	Einfluss der Streustrahlenbelastung bei Herzkatheter- untersuchungen.....	11
1.2.1	Klassische Streuung.....	11
1.2.2	Compton-Streuung	11
1.3	Strahlenschutzmaßnahmen während katheterinterventionellen Eingriffen an den Herzkranzarterien und peripheren Gefäßen	13
1.3.1	Geräteeinstellung	13
1.3.2	Persönliche Strahlenschutzmaßnahmen.....	14
1.3.2.1	Bleischürzen.....	14
1.3.2.2	Bleikragen als Schilddrüsen-Schutz	15
1.3.2.3	Bleiglasbrille mit seitlichem Schutz.....	16
1.3.2.4	Abschirmung der Streustrahlung mit Bleiglasabschirmung und Bleilamellen, je nach Anlagenaufbau	17
1.3.2.5	Abstand Röntgen-Röhre – Untersucher	18
1.3.2.6	Durchleuchtung und Kino-Aufnahme.....	19

1.4	Rechtliche Grundlagen des Strahlenschutzes.....	20
1.4.1	Stand der Verordnung.....	21
1.4.2	Der Erwerb der Fachkunde.....	21
1.4.3	Fachkundebescheinigung.....	23
1.4.4	Aktualisierung der Fachkunde.....	23
1.4.5	Strahlenschutzbereiche.....	23
1.4.5.1	Überwachungsbereich.....	23
1.4.5.2	Kontrollbereich.....	24
1.4.5.3	Sperrbereich.....	24
2.	Material und Methoden.....	26
2.1	Einstellungen.....	26
2.2	Durchführung.....	26
2.3	Punktionsstelle.....	27
2.4	Ausrüstung.....	27
2.5	Technische Anforderungen.....	29
2.6	Dose Aware System.....	29
2.6.1	Dose Aware Komponenten.....	30
2.6.1.1	Personal Dose Meter (PDM).....	30

2.6.1.2	Basis Station	30
2.6.1.3	Dose View	30
2.7	Effektive Dosis.....	31
2.8	Augen Dosis	31
2.9	Handdosis	31
2.10	Zytogenetische Analyse	32
3.	Ergebnisse	33
3.1	Einfluss der Eingriffsart	34
3.1.1	Effektive Dosis.....	34
3.1.2	Augen Dosis	35
3.1.3	Hand Dosis.....	35
3.1.4	Einfluss des BMI- Index.....	35
3.1.5	Einfluss der Durchleuchtungszeit	36
3.1.6	Zytogenetische Analyse	38
4.	Diskussion.....	39
4.1	Abschätzung der jährlichen Strahlenexposition.....	40
4.2	Gesundheitsrisiken.....	43
4.2.1	Körper	43

4.2.2	Augen und Hände	44
4.2.2.1	Augen.....	44
4.2.2.2	Hände.....	45
4.3	Studie Einschränkungen	45
5.	Zusammenfassung.....	46
6.	Abkürzungen	48
7.	Literatur	51
8.	Danksagung	63
9.	Lebenslauf.....	64
10.	Eidesstattliche Erklärung	66

1. Einleitung

1.1 **Strahlenexposition bei katheterinterventionellen Eingriffen an den Herzkranzarterien und peripheren Gefäßen**

Die Strahlenbelastung durch medizinische Prozeduren stellt für den Untersucher, das Personal und die Patienten ein bekanntes Problem dar (Mettler 2009).

Die Eingriffe an Herzkranzgefäßen und an peripheren Gefäßen in einem Herzkatheterlabor gehören zu den radiologischen Verfahren mit einer hohen Strahlenexposition für Patienten und bei fehlenden oder unzureichenden Strahlenschutzmaßnahmen auch für den Untersucher (Hannig et al. 1997, Ewen et al. 1995).

Heutzutage werden Röntgenstrahlen in der diagnostischen Kardiologie verwendet, um z.B. Stenosen bzw. Verschlüsse von Herzkranzgefäßen festzustellen und zu lokalisieren. Unter ständiger Durchleuchtungskontrolle wird der Katheter entweder von der A. femoralis oder von der A. radialis bis zu den Abgängen der Herzkranzgefäße vorgeschoben, dort ein Röntgen-Kontrastmittel appliziert, und über dessen Ausbreitungsverhalten in den Herzkranzgefäßen Rückschlüsse über die Durchblutung bzw. Sauerstoffversorgung des Myokards gezogen (Ewen 1995).

Die Herzkatheteruntersuchung zählt inzwischen zu den Standardmethoden in der klinischen Praxis. Es wurden im Jahr 2009 deutschlandweit 864.858 Linksherzkatheteruntersuchungen durchgeführt, davon waren 310.166 perkutane Koronarinterventionen (PCI), wobei 271.439 Stents eingesetzt wurden (Bruckenberg 2009).

Die Praxis zeigt, dass einerseits die Strahlenbelastung für den Untersucher im Herzkatheterlabor in der Regel unter optimierten Bedingungen unter der gesetzlich vorgeschriebenen Dosisgrenze liegt, andererseits aber Mängel in der Schutzausrüstung zu erheblichen Dosiserhöhungen führen können (Von Boetticher 2003, Ewen 1997).

Allein das Fehlen des Schilddrüsenschutzes kann zu einer Erhöhung der Dosis um den Faktor 2 bis 3 führen (von Boetticher H, 2008). Aus diesem Grund gehört der Schilddrüsenschutz zu den wichtigen persönlichen Strahlenschutzmaßnahmen im Röntgenbereich (von Boetticher et al. 2003).

Bei der Betrachtung des Strahlenrisikos für den Untersucher bei katheterinterventionellen Eingriffen in Herzkatheterlaboren geht es in erster Linie um das Auftreten von strahleninduzierten Krebserkrankungen.

Die Folgen von Strahlenschäden lassen sich beispielsweise an den Atombombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki im August 1945 oder dem Reaktorunfall von Tschernobyl 1986 nachvollziehen (Schmitz-Feuerhake 2009, Schonfeld 2011).

Es zeigte sich, dass in den Jahren 1959 bis etwa 1970 unter den Atombombenüberlebenden in Hiroshima und Nagasaki etwa doppelt so viele Leukämien aufgetreten sind, als normalerweise zu erwarten gewesen wären (Shimizu et al. 1988).

Inzwischen wurde festgestellt, dass fast alle Arten von Krebserkrankungen wie Brustkrebs, Lungenkrebs oder Magenkrebs bei strahlenexponierten Personen gehäuft aufgetreten sind, aber erst bei höheren Strahlenexpositionen als bei den Leukämien und diese Häufungen wurden besonders bei Personen höheren Alters erkennbar (Thompson et al. 1994, Ron et al. 1994).

Die strahleninduzierten Leukämiefälle sind mit einer Latenzzeit von fünf bis fünfzehn Jahren aufgetreten und verringern sich anschließend wieder (Jung 1991, Jung 1995).

Die Atombombenüberlebenden werden auch heute weiter beobachtet, da die Erhöhung der Krebsraten mit Ausnahme von Leukämien erst jetzt bei denen deutlich wird, die im Kindesalter einer Strahlung ausgesetzt waren (Cologne und Preston 2000).

Durch den Reaktorunfall in Tschernobyl traten insbesondere in Weißrussland, aber auch in der Ukraine und in Russland deutlich vermehrt Schilddrüsenkarzinome auf, vor allem bei Kindern, die bei der Reaktorkatastrophe jünger als 10 Jahre alt waren (Schonfeld et al. 2011).

Strahleninduzierte Spätschäden entstehen durch Erzeugung von Mutationen und Transformationen in den betroffenen Zellen, die nach Jahren oder Jahrzehnten zu einer Krebserkrankung und einer Erbkrankheit führen können (Jung 1998).

Von der Internationalen Strahlenschutzkommission wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten schwerer genetischer Schäden in allen zukünftigen Generationen mit $0.2\% \text{ Sv}^{-1}$ angegeben. Dieser Wert ist etwa 25mal geringer als das Risiko für tödlich verlaufende Tumorerkrankungen. Das Risiko für die erste und zweite Generation wird mit jeweils $0.1\% \text{ Sv}^{-1}$ angegeben, die restlichen $0.1\% \text{ Sv}^{-1}$ verteilen sich auf alle späteren Generationen (ICRP 2008).

Ziel dieser Studie war es festzustellen, mit welcher Strahlenbelastung für den Operator in einem Herzkatheterlabor, abhängig von der Prozedur (koronar vs. Periphere), zu rechnen ist und bei Anhaltung der üblichen Strahlenschutzmaßnahmen.

Mit Hilfe eines neuen Verfahrens („Dose Aware System“ der Fa. Philips) konnte die Strahlenexposition des Operators pro Prozedur kontinuierlich erfasst werden.

Den Operatoren wurde Blut abgenommen, um eine Chromosomenanalyse zur Frage der Anzahl der Chromosomenbrüche in Abhängigkeit von der Dosis und der Lebensarbeitszeit durch das Bundesamt für Strahlenschutz durchführen zu lassen.

1.2 Einfluss der Streustrahlenbelastung bei Herzkatheteruntersuchungen

Durch die Wechselwirkung der Röntgenstrahlen (sog. Primärstrahlung) mit Materie, tritt sowohl eine Absorption der Strahlung durch die Materie als auch eine Streustrahlung (sog. Sekundärstrahlung) mit einer Richtungsänderung auf (Krieger 2007).

Für die Strahlenbelastung des Operators und des übrigen Personals in einem Herzkatheterlabor ist die Streustrahlung, die im durchstrahlten Objekt erzeugt wird, von besonderer Bedeutung (Shortt et al. 2007, Fuchs et al. 1999).

Streustrahlung entsteht durch zwei Prozesse, zum einem durch die klassische Streuung, zum anderen durch Compton-Streuung.

1.2.1 Klassische Streuung

Bei der klassischen Streuung ändert das Photon seine Flugrichtung im kernnahen Bereich ohne dass es an Energie verliert (Vogt und Schultz 2010).

1.2.2 Compton-Streuung

Bei der Compton-Streuung ändert das Photon seine Richtung und verliert zusätzlich an Energie (Krieger 2002, Thrall 2002).

Diese beiden Effekte können für den Operator und den Patienten zum einen durch Abschwächung der Primärstrahlung und Kontrastminderung zu einer Verschlechterung der Bildqualität, und zum anderen zu einer zusätzlichen Strahlenexposition führen (Reiser 2006).

In der Abb. 1 ist eine typische Winkelverteilung in Richtung der Röntgenröhre und in Richtung des Nutzstrahlenbündels dargestellt. Diese Winkelverteilung kann zu einer Strahlenexposition des Operators im Nahbereich des Patienten führen (Laubenberger 1999, Krieger 2002).

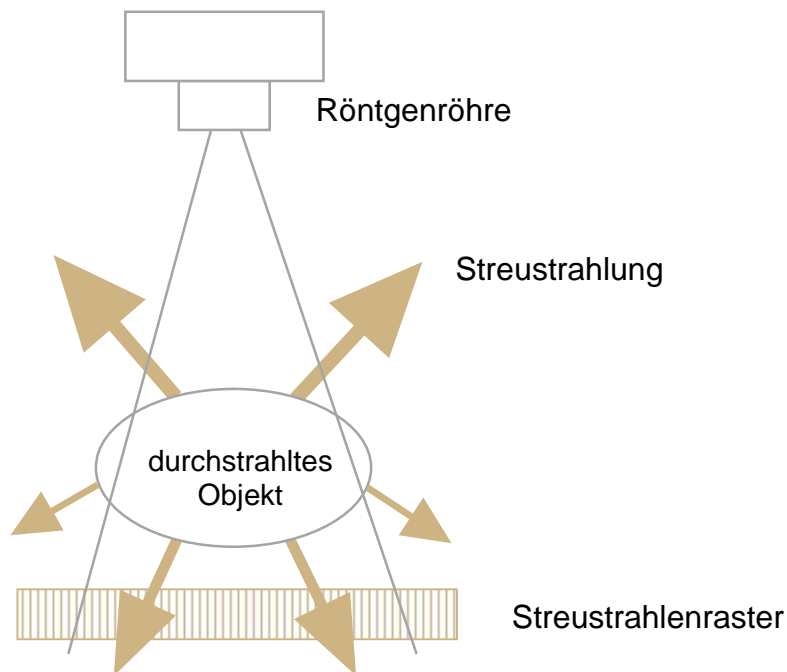


Abbildung 1: Winkelverteilung der Compton-Streuung (Krieger 2002)

Durch Reduzierung der Streustrahlung werden sowohl bei dem Patienten als auch bei dem Operator und dem Personal die Strahlenexposition generell reduziert (Detorie et al. 2007).

Aus diesem Grund ist es von Bedeutung, die folgenden Maßnahmen zu ergreifen:

- Einblendung, die zu einer Strahlenreduktion des Operators und des Patienten führen kann,
- persönliche Strahlenschutzmaßnahmen, die die Streustrahlung weiterhin beträchtlich reduzieren können und
- Verwendung eines Streustrahlenrasters.

Unter dieser Voraussetzung führen die oben genannten Punkte zu einer Reduzierung der Streustrahlung, die wiederum zu einer Verbesserung der Bildqualität und somit auch zur Reduktion der Strahlenexposition außerhalb des Nutzstrahlenfeldes führen kann (Detorie 2007, Kauffmann 2006).

1.3 Strahlenschutzmaßnahmen während katheterinterventionellen Eingriffen an den Herzkranzarterien und peripheren Gefäßen

Bei Einhaltung der vorgeschriebenen Strahlenschutzmaßnahmen gilt der Herzkatheterlabor laut National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) als sicherer Arbeitsplatz. Fehlende oder unzureichende Strahlenschutzmaßnahmen sowie Änderungen bei den Betriebsbedingungen der Anlage können zu erheblichen Dosiserhöhungen der Strahlenexposition führen (Folkerts et al. 1997).

Die folgenden Faktoren, die einen Einfluss auf die Strahlenbelastung haben können, sind:

- Die Geräteeinstellungen einschließlich der Röhrenangulation und Einblendung, sowie
- die Anwendung von persönlichen Strahlenschutzmaßnahmen.

Andere Faktoren, welche die Strahlenbelastung auch bei einer Herzkatheteruntersuchung beeinflussen können, sind vor allem die Komplexität und der Typ des Eingriffs, BMI des Patienten, Durchleuchtungszeit und auch die Erfahrung des Operators (Vano et al. 2006). Es wurde geschätzt, dass ein Kardiologe, der in seinem ersten Ausbildungsjahr ist, bis 60% mehr Strahlendosis erhalten kann im Vergleich mit einem Kardiologen, der in seinem zweiten Ausbildungsjahr ist (Watson et al. 1997).

1.3.1 Geräteeinstellung

- Die Optimierung der Bildverstärkereingangsdosisleistung auf adäquate statt bestmögliche Bildqualität ist ein wichtiger Faktor, der mit bis zu 45% die Strahlendosis reduzieren kann (Kuon 2005b).

- Wenn möglich, sollen Projektionsebenen mit möglichst niedriger Strahlenbelastung für den Operator und den Patienten gewählt werden. Insbesondere durch Reduktion der Verwendung der LAO- Projektionen kann die Strahlungs dosis um das etwa 2.3-Fache reduziert werden (Kuon et al. 2004b, Pitney et al. 1994).
- Neue entwickelte Geräte ermöglichen durch eine Serienbegrenzung mittels Triggerung der radiographischen Bilderanzahl auf einen Herzzyklus eine Reduktion der Strahlungs dosis auf weniger als 10% (Kuon et al. 2005a).
- Extreme laterale Röhrenangulationen 50° , die zudem 20° kranio-kaudal gehören sollten wegen der Strahlenbelastung möglichst vermieden werden (Kuon 2004b).

1.3.2 Persönliche Strahlenschutzmaßnahmen

1.3.2.1 Bleischürzen



Abbildung 2: Bleischürze (Weste/Rock) 0.25 mm Pb-Äq

In der Regel haben die Westen bzw. Röcke beim Tragen einen Bleigleichwert von 0,25 mm. Die vordere doppelte Dicke von 0,25 mm weist einen Bleigleichwert von 0,5 mm auf. (Klein et al. 2009).

Aufgrund der häufig langen Untersuchungszeiten im Stehen werden Westen bzw. Röcke mit einem Bleigleichwert von 0,25 mm denen mit einem Bleigleichwert von 0.5 mm vorgezogen. Dies führt zu einer erheblichen Gewichtsreduzierung und dadurch zu einer Verringerung der körperlichen Belastung von Wirbelsäule und Schultergelenk und ermöglicht trotzdem einen einigermaßen ausreichenden Strahlenschutz (Detorie et al. 2007, Eder 1995).

Um eine Verschlechterung oder Defekte in dem Schutzmaterial zu erkennen, sollte eine jährliche Überprüfung der Bleischürzen durchgeführt werden (Christodoulou et al. 2003).

1.3.2.2 Bleikragen als Schilddrüsen-Schutz

Der Kopf und Hals des Operators sind während der Eingriffe in der Regel nicht oder schlecht geschützt, aus diesem Grund können Organe in diesem Bereich hohe Strahlendosen erhalten (Kuon et al. 2003, Ciraj-Bjelac et al. 2010).

Durch Verwendung eines Schilddrüsen-schutzes werden die darunter liegende Haut, Speiseröhre, Wirbel und Knochenmark sowie die Schilddrüse geschützt, wodurch die Effektive Dosis etwa um einen Faktor 2 bis 3 reduziert wird (von Boetticher 2008, Ewen 1997).



Abbildung 3: Schilddrüsen-Schutz

1.3.2.3 Bleiglasbrille mit seitlichem Schutz

Bleiglasbrillen mit seitlichem Schutz bieten mehr Schutz als Brillen ohne diese Funktionen. Sie helfen auch dabei, die Strahlung von der Seite und Strahlung auf den eigenen Kopf des Operators zu minimieren (Cousin et al 1987). Der einzige Nachteil der Bleiglasbrille beim Tragen ist ihr Gewicht.

Die Bleiglasbrillen reduzieren die Augendosis bei einer frontalen Exposition um einen Faktor 8-10 (Thornton et al. 2009, Marshall et al. 1992) und bei einer seitlichen Exposition um einen Faktor 2-3 (Moore et al. 1980).

Die klinischen Studien belegen, dass bei einem nichtoptimierten Strahlenschutz mögliche Spätschäden an Augenlinsen (Katarakt) auftreten können. Durch eine Überschreitung der Schwellendosis werden die Zellen, die nicht durch Proliferation anderer Zellen kompensiert werden können, zerstört (Vano et al. 2008, ICRP. 2007). In der wissenschaftlichen Literatur wird für die Augenlinse eine Dosismenge von bis zu 900 mSv (der neue Grenzwert für die Augenlinsendosis beträgt 20 mSv pro Jahr) berichtet (Vano et al. 1998).

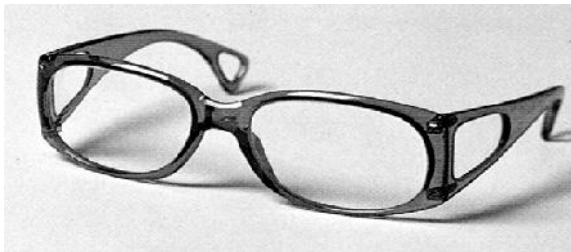


Abbildung 4: Bleiglasbrille

1.3.2.4 Abschirmung der Streustrahlung mit Bleiglasabschirmung und Bleilamellen, je nach Anlagenaufbau

Eine Bleiglasabschirmung schützt die Augen, den Oberkörper und die Hände des Untersuchers vor der Röntgenstrahlung. Eine richtig platzierte Bleiglasabschirmung kann die Augendosis des Untersuchers deutlich reduzieren (Maeder et al. 2006, Thornton et al. 2009).

Es wurde berichtet, dass Bleiglasabschirmungen die Untersucherdosis um einen Faktor von 3-20 reduzieren können (Pratt und Shaw 1993, Vano et al. 1998).

Die Anwendung der Röntgenschutzscheibe während einiger Eingriffe, besonders bei der peripheren Angiographie, ist aufgrund des sehr eng begrenzten Arbeitsraumes nicht möglich. Aus diesem Grund ist der Untersucher ungenügend vor der Röntgenstrahlung geschützt und muss sogar teilweise im Strahlengang, in einem Arbeitsradius von 300-400mm entfernt von der Röntgenquelle arbeiten (Wagner und Mulhern 1996).

Eine Bleilamelle schützt die Gonaden, Beine und die Füße des Operators vor Röntgenstrahlung. Das kann die Strahlenexposition um einen Faktor 10-40 reduzieren (Theocharopoulos et al. 2006, Balter et al. 1978).



Bleiglasscheibe als zusätzliche Abschirmung bei der Durchleuchtung



Unterkörperstrahlenschutz

Abbildung 5: Abschirmung der Streustrahlung mit Bleiglasabschirmung und Bleilamellen

1.3.2.5 Abstand Röntgen - Röhre - Untersucher

Das Abstandsgesetz stellt den Zusammenhang zwischen dem Abstand zu einer Strahlungsquelle und der Intensität der Strahlung dar.

Durch Entfernung von der Röntgenquelle wird die Strahlungsbelastung proportional laut quadratischen Gesetzes reduziert. Durch Entfernung des Untersuchers von der Strahlenquelle nimmt die Dosisleistung nicht linear (doppelter Abstand = halbe Dosis) sondern quadratisch (doppelter Abstand = Viertel der Dosis) (Krieger 2002).

Der typische Abstand zwischen dem Untersucher und dem Patienten während der Eingriffe ist ca. 0,75 m (Vano et al. 1998). Die Vergrößerung des Abstandes zwischen dem Untersucher und dem Patienten auf 1 m kann die berufliche Strahlendosis des Untersuchers um etwa die Hälfte verringern (Kim und Miller 2009)

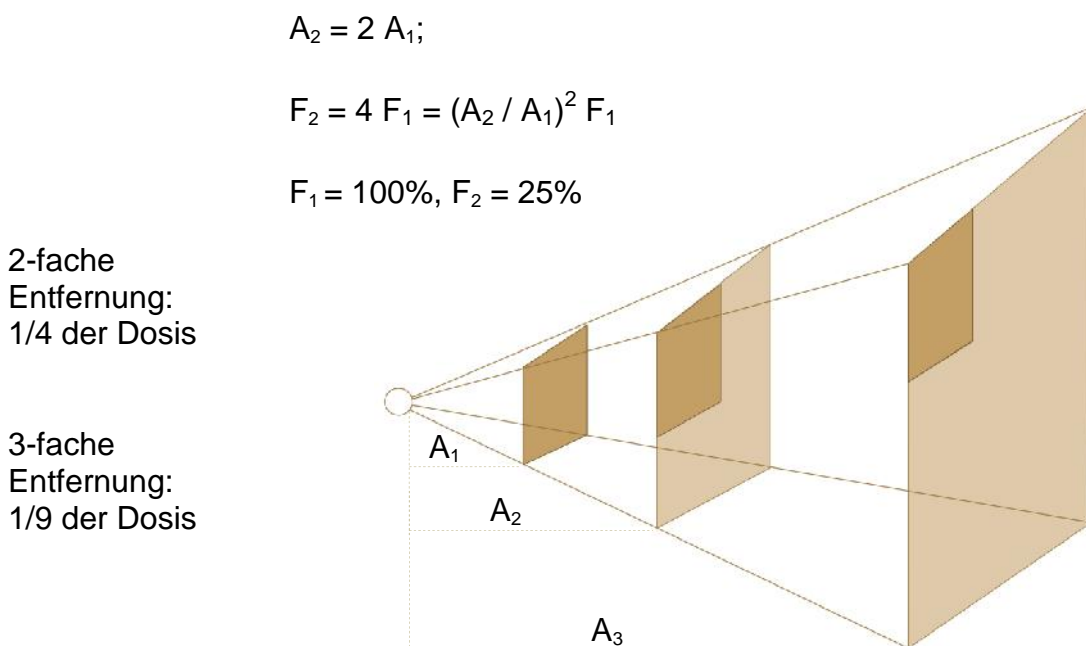


Abbildung 6: Quadratisches Abstandsgesetz (Loewenhardt B, Müller E, 1997)

1.3.2.6 Durchleuchtung und Kino-Aufnahme

Die gepulste Durchleuchtung führt zu einer zusätzlichen Reduktion der Strahlendosis. Dabei wird die Röntgenstrahlung nicht länger kontinuierlich, sondern in Form kurzer „Blitze“ appliziert.

Die in der Literatur durchgeführten Untersuchungen ergaben bei der Anwendung der gepulsten Durchleuchtung bei 15 Bildern/s eine durchschnittliche Dosisersparung von 22%, bei 10 Bildern/s eine Dosisersparung von 38% und bei 7,5 Bildern/s eine Dosisersparung bis zu 49% (SV-RL 2003, Aufrichtig et al. 1994).

Bei einer Kino-Aufnahme (z.B. Ventrikel 25/sec, Koronarien 12,5-25/sec.) kann die Strahlungsbelastung bis um das 10-fache höher als bei einer Normalaufnahme sein (Seifert et al. 2000).

Aus diesem Grund sollte der Untersucher alle möglichen Schutzeinrichtungen nutzen, um die Dosis für sich, für den Patienten und andere Mitarbeiter im Raum zu minimieren (Schmidt und Stieve 1996).

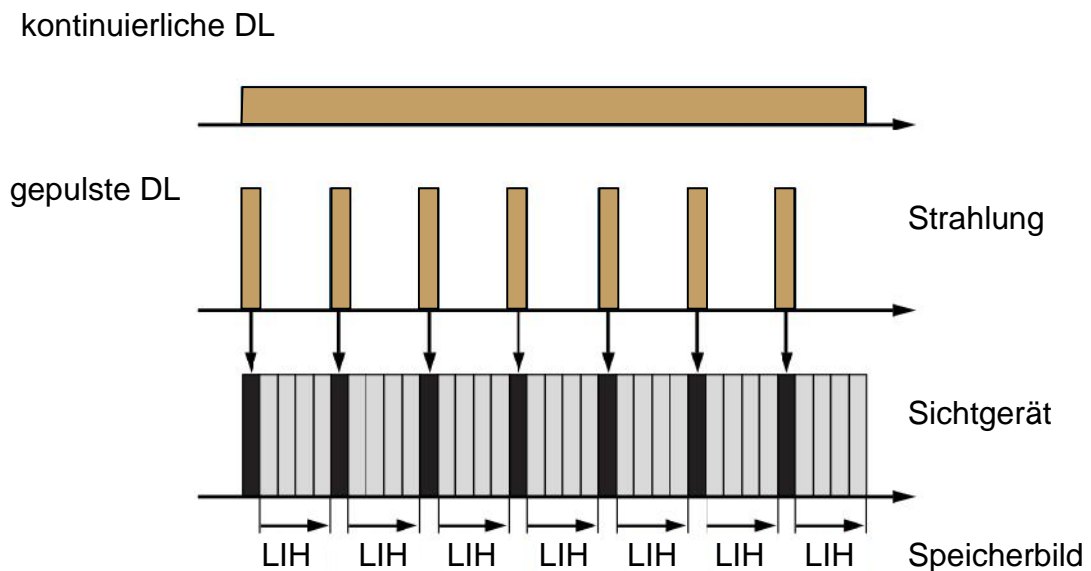


Abbildung 7: Dosisleistung bei kontinuierlicher Durchleuchtung, Last-Image-Hold und gepulster Durchleuchtung (H. D. Nagel, Philips Medizin Systeme Hamburg, Abt. Wissenschaft & Technik)

1.4 Rechtliche Grundlagen des Strahlenschutzes

Laut RöV darf die Effektive Dosis bei einem beruflich strahlenexponierten Untersucher den Grenzwert von 20 mSv im Kalenderjahr nicht überschreiten, Die Berufslebensdosis, also die Summe der in allen Kalenderjahren ermittelten Effektiven Dosen beruflich Strahlenexponierter, darf den Grenzwert von 400 mSv nicht überschreiten (Kauffmann 2006).

Da die Untersuchungen und Eingriffe in einem Herzkatheterlabor zu den radiologischen Verfahren mit einer hohen Strahlenexposition für den Untersucher und auch dessen Mitarbeiter gehören, erscheint es umso wichtiger, dass sich das Personal der Strahlenbelastung, die mit dieser Untersuchung verbunden ist, bewusst ist und entsprechende Maßnahmen ergreift, um diese sinnvoll zu reduzieren (Hamm et al 2008, von Boetticher et al. 2003).

Um die Strahlenbelastung sowohl für den Operator als auch für das Personal besonders gering zu halten, gibt es einige rechtliche Grundlagen, die es einzuhalten gilt. (Reiser 2006).

Des Weiteren gilt das sogenannte ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable), wie es in der ICRP-Empfehlung Nummer 26 beschrieben wird, welches besagt, dass die Strahlenexpositionen so niedrig wie vernünftigerweise möglich gehalten werden sollen (Reiser 2006, Kuon und Kaye 2002, Kuon et al. 2003).

Weiterhin sind die 5 A's des Strahlenschutzes zu beachten: Abstand von der Strahlenquelle, Abschirmung verwenden, Aufenthaltszeit begrenzen Aufnahme (Inkorporation) von radioaktiven Substanzen vermeiden und Aktivität (Intensität) verringern (Vogt et al. 2010).

1.4.1 Stand der Verordnung

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) stammt aus dem Jahr 1976 und wurde seitdem mehrfach aktualisiert. Die letzte Änderung wurde am 24. Februar 2012 durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes (BGBl. I S. 212) in Kraft gesetzt.

1.4.2 Der Erwerb der Fachkunde

Der Erwerb der Fachkunde „Anwendung von Röntgenstrahlen bei Interventionen“ erfordert laut § 18 a Abs. 2 RöV für Ärzte den Besuch an einem Spezialkurs im Strahlenschutz in der Röntgendiagnostik (Hamm et al. 2001, Bundesamt für Strahlenschutz 2003, Hirshfeld et al. 2005).

Nach erfolgreicher Teilnahme am Grundkurs darf ein Arzt Röntgenstrahlen bei Patienten unter Aufsicht und Verantwortung eines Arztes mit Fachkunde anwenden (FK-RL 2006).

Eine weitere Voraussetzung für den Erwerb der Fachkunde ist die Teilnahme an einem Spezialkurs im Strahlenschutz und dieser Kurs kann erst nach erfolgreicher Teilnahme an einem Grundkurs besucht werden.

Als Strahlenschutzbeauftragter des Herzkatheterlabors ist in der Regel der leitende Arzt und ist für die regelmäßige Durchführung der Strahlenschutzbelehrung der Mitarbeiter, die Wartung und kontinuierliche Prüfungen der Anlagen sowie die Kontrolle der Dosimetrie des Katheterpersonals verantwortlich (Hamm et al. 2001, Kuon et al. 2002, Bundesamt für Strahlenschutz 2003).

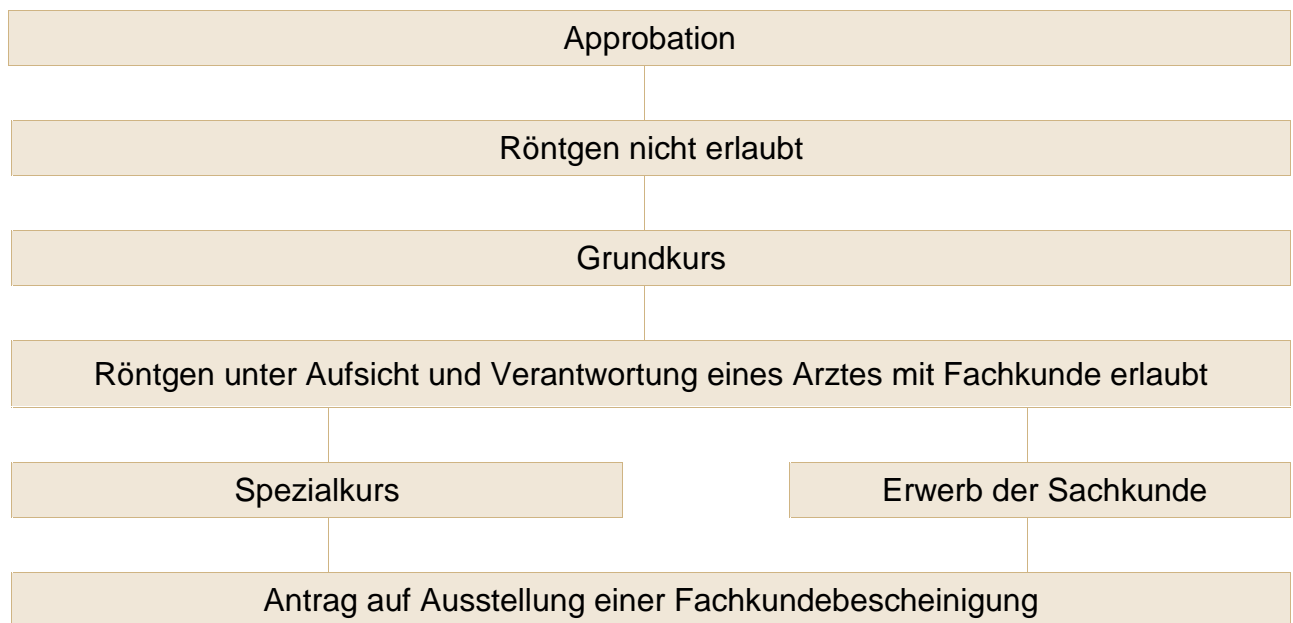


Tabelle 1: Zeitlicher Verlauf des Erwerbs der Fachkunde

Laut Gesetz § 24 Abs. 1 Röntgenverordnung dürfen die Röntgenstrahlung am Menschen folgende Personen anwenden:

- Approbierte Ärzte oder solche, denen die Ausübung des ärztlichen Berufs erlaubt ist, die die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz für das Gesamtgebiet der Röntgenuntersuchung besitzen,
- Approbierte Ärzte oder solche, denen die Ausübung des ärztlichen Berufs erlaubt ist, die die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz für das Teilgebiet der Anwendung der Röntgenuntersuchung, in dem sie tätig sind, besitzen,
- Approbierte Ärzte oder solche, denen die Ausübung des ärztlichen Berufs erlaubt ist, die nicht die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz besitzen, wenn sie unter ständiger Aufsicht und Verantwortung einer Person mit Fachkunde im Strahlenschutz auf einem Anwendungsgebiet oder für das Gesamtgebiet tätig sind und über die erforderlichen Kenntnisse im Strahlenschutz verfügen.

1.4.3 Fachkundebescheinigung

Die Bescheinigung wird von der Ärztekammer, Abteilung für Weiterbildung in Hamburg, ausgestellt.

1.4.4 Aktualisierung der Fachkunde

Die Fachkunde im Strahlenschutz muss mindestens alle fünf Jahre durch eine erfolgreiche Teilnahme in einem Kurs von 8 Stunden Dauer einschließlich Prüfung aktualisiert werden (RöV 2002).

1.4.5 Strahlenschutzbereiche

Berufliche strahlenexponierte Personen können durch ihre Tätigkeit eine hohe Effektiven Dosis mehr als 1 mSv/Jahr erhalten (von Boetticher et al. 2007).

Nach der Röntgenverordnung gibt es drei Strahlenschutzbereiche:

- 1) Überwachungsbereich
- 2) Kontrollbereich
- 3) Sperrbereich

1.4.5.1 Überwachungsbereich

Überwachungsbereiche sind die Bereiche, in denen Personen eine höhere Ganzkörperdosen als 1 mSv im Jahr oder höhere Organdosen als 15 mSv pro Kalenderjahr für die Augenlinse oder 50 mSv/Jahr für die Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können (von Boetticher et al. 2003).

Hier tätige Personen gelten als beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B.

1.4.5.2 Kontrollbereich

Im Kontrollbereich arbeiten Personen, die im Kalenderjahr eine Effektive Dosis von mehr als 6 mSv als Ganzkörperdosis erhalten können.

Kontrollbereiche müssen abgegrenzt und deutlich sichtbar gekennzeichnet sein. Bei Personen, die im Kontrollbereich arbeiten, müssen die Körperdosen durch ein amtliches Dosimeter bestimmt werden (von Boetticher et al. 2003).

Hier tätiges Personal bezeichnet man als beruflich strahlenexponierte Person der Kategorie A.

Ein Herzkatheterlabor ist immer ein Kontrollbereich.

1.4.5.3 Sperrbereich

Sperrbereiche sind Bereiche innerhalb eines Kontrollbereichs, in denen die Ortsdosisleistung höher als 3 mSv pro Stunde sein kann. Sperrbereiche sind abzugrenzen und deutlich sichtbar zu kennzeichnen (von Boetticher et al. 2003).

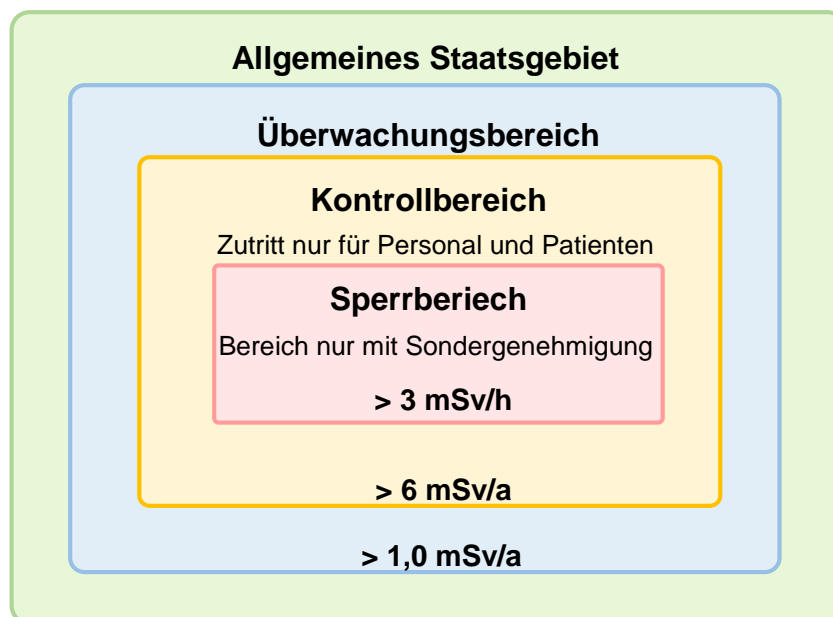


Abbildung 8 Strahlenschutzbereiche

Körperdosis	Grenzwerte (mSv) pro Jahr			
	1989	1996	2001	2013
Effektive Dosis	50	50	20	20mSv/Jahr gemittelt über einen Zeitraum von 5 Jahren
Organdosis:				
Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50	50	50	
Augenlinse	150	150	150	20 mSv/Jahr gemittelt über einen Zeitraum von 5 Jahren
Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre				150
Schilddrüse, Knochenoberfläche	300	300	300	
Haut	300/500	500	500	500
Extremitäten	500	500	500	500

Tabelle 2: Dosisgrenzwerte bei beruflicher Strahlenexposition(mSv/Jahr) (ICRP 2007, ICRP 2013)

Die beruflichen Dosisgrenzwerte, die von der ICRP empfohlen wurden, sind von den meisten Ländern der Welt übernommen worden, einschließlich der Europäischen Union und der Vereinigten Staaten [ICRP(International Commission on Radiological Protection) 2007].

Die Grenzwerte wurden in der Europäischen Union etwas anders festgelegt als in den Vereinigten Staaten. Der Grenzwert der Effektiven Dosis in der Europäischen Union beträgt 20 mSv/Jahr, gemittelt über einen Zeitraum von 5 Jahren (Cousins et al. ICRP 2013), derjenige in den USA beträgt 50mSv/Jahr oder als kumulative Dosis $10 \text{ mSv} \times \text{Alter/Lebensdauer}$ (NCRP 1993).

2. Material und Methoden

2.1 Einstellungen

Zur Ermittlung der Strahlenexposition der Untersuchern trugen diese bei ca. 284 Eingriffen an verschiedenen Körperbereichen, in dem Zeitraum: vom 07.06.2010 bis 20.09.2010 jeweils drei Dosismessgeräte.

Die Strahlungsbelastung von den drei Untersuchern wurde am Körper unterhalb der Bleischürze, am Hals oberhalb der Bleischürze und an der Hand gemessen.

2.2 Durchführung

Die Strahlenbelastung des Untersuchers wurde bei folgenden Prozeduren an verschiedenen Bereichen gemessen:

- Koronarangiographie (CAG),
- Perkutane koronare Intervention (PCI),
- periphere Eingriffe im Beckenbereich,
- periphere Eingriffe im Oberschenkelbereich,
- periphere Eingriffe im Unterschenkelbereich,

Bei der Durchführung der Studie wurde zunächst bei den drei Untersuchern die Strahlenbelastung pro Prozedur und während der gesamten durchgeführten Prozeduren untersucht.

Die ermittelten Ergebnisse von ca. 284 Untersuchungen wurden einer statistischen Analyse unterzogen und zur Abschätzung der zu erwartenden jährlichen Strahlenexposition des Untersuchers benutzt.

2.3 Punktionsstelle

Für die meisten Untersuchungen wurde ein Zugang über die A. femoralis gewählt. Durch die Punktionsstelle über die A. femoralis im Gegensatz zum Vorgehen über die A. radialis oder A. brachialis) ist man in ausreichendem Abstand von der Röntgenquelle (Eder 1995).

Die Punktion in die Arterie femoralis konnte retrograd bei Interventionen im Bereich des Beckens oder supraaortalen Gefäßen sowie auch zum gegenseitigen Bein in Cross-over-Technik aber auch zur antegraden Punktion der gleichseitigen Extremität genutzt werden (Larrazet 2003).

Der Zugang über A. Radialis oder A. brachialis wurde als besonderer Zugang genutzt, wenn ein Zugang über A. femoralis schwer oder nicht möglich war (Whitby and Martin 2005). Bei diesen Zugängen ist aber die Strahlenexposition für den Untersucher, gegenüber dem transfemorale Zugang etwa doppelt so hoch (Wholey 1974).

Ein retrograder transpoplitealer Zugang konnte in Einzelfällen bei Rekanalisationen am Oberschenkel genutzt werden. Der Patient befand sich dabei in Bauchlage.

2.4 Ausrüstung

Die Untersuchungen wurden in zwei Katheterlaboren durchgeführt. Diese waren mit digitalen Durchleuchtungsanlagen ausgerüstet und erfüllten alle wesentlichen technischen Merkmale zur Reduktion der Strahlenexposition wie Filterung, Blendsystem, Röntgeneratoren hoher Leistung und geringer Welligkeit, gepulster Durchleuchtung und der Bildspeicherung.

Die Katheterlabore waren mit Philips (Hamburg Germany) Röntgen System Allura Xper FD 10 (MRC 200 0508 ROT-GS 1003 Röntgenröhre) für koronare Interventionen und Allura Xper FD 20 (MRC 200 0407 ROT-GS 1004 Röntgenröhre) für periphere Interventionen ausgestattet und verfügten beide über eine automatische Dosisregelung der jeweiligen Prozedur entsprechend.

Die Generatoren wurden auf 50 bis 120kV (75 kV im Durchschnitt) abhängig von dem Gewicht des Patienten eingestellt und der Strom auf 50 bis 1,000mA (800mA im Durchschnitt) entsprechend angepasst.

Die Eintrittsdosisrate der Detektoren im Durchleuchtungsmodus variierte für die koronaren zwischen 42 und 84 mGy x min⁻¹ und für periphere Interventionen zwischen 21 und 84 mGy x min⁻¹

Die Strahlenfilter des Röntgensystems waren mit einem Zusatz-filter von 2,6 mm A1 ausgestattet.

Bei koronaren Interventionen wurde eine Zusatzfilterung von 0,4mm Cu/1.0mm A1 gleichwertig oder 0,1mm / 1,0mm A1 und bei den peripheren Interventionen von 0.9, 0,4 und 0.1mm Cu/1.0mm A1 angewendet.

Die Bildgeschwindigkeit bei der gepulsten Durchleuchtung für beide Röntgen Systeme war 7.5 x S⁻¹ oder 15 x S⁻¹.

Die Kino/Durchleuchtungs-Dosis des Detektors für beide Röntgen Systeme betrug 20 bis 20,000 mGy.Frame⁻¹.

Bei dem Kino/Durchleuchtungs-Modus wurden Spektrale Filter von 0.9, 0,4 und 0.1mm Cu/1.0mm A1 angewendet. Die Bildrate (Bildfrequenz) bei koronaren Prozeduren im Kinomodus war 15 x S⁻¹ abhängig von der Geschwindigkeit des Kontrastmittels, und bei Prozeduren im Becken, Oberschenkel und Unterschenkelbereich in der Durchleuchtung, der Modus war dabei 6 x S⁻¹.

2.5 Technische Anforderungen

Die Räume, in denen Röntgengeräte für Interventionen genutzt wurden, sind bezüglich ihrer räumlichen Ausdehnung (Fläche, Höhe) großzügig dimensioniert und das ermöglichte dem Operator und dem Personal, sich ungestört von geräte- und strahlenschutztechnischen Einrichtungen innerhalb des Raums zu bewegen.

Zwischen Röntgenraum und Bedienungsraum besteht eine Sicht- und Sprechverbindung. Die Fensterfläche ist so groß gewählt worden, dass mindestens zwei Personen vom Bedienungsraum aus die Vorgänge im Röntgenraum beobachten können.

Dem Stand der Technik für Röntgenanlagen zur Intervention entsprechend, werden heute ausschließlich digitale Systeme verwendet.

2.6 Dose Aware System

Mit Hilfe eines neuen Verfahrens Dose Aware System (Philips) konnte die Strahlenexposition des Untersuchers momentan und kumulativ erfasst werden. Somit konnte die Strahlenexposition pro Prozedur sowie über die gesamten durchgeführten Prozeduren gemessen werden.

Die drei Untersucher (zeitweise auch vier Operatoren) waren mit jeweils drei PDMs (Personal Dose Meter) ausgerüstet. Ein PDM war unter der Bleischürze, ein PDM am Hals oberhalb der Bleischürze und ein PDM am Handgelenk befestigt.

Die Dosimeter haben die empfangene Strahlendosis gemessen und diese wurde in Echtzeit auf einen im Herzkatheterlabor befindlichen Monitor (Basis Station) drahtlos übertragen (Siehe Abb. 9).

Die Darstellung auf dem Monitor wurde in einen roten (hohe Strahlendosis (SD)), gelben und grünen (niedrige SD) Bereich unterteilt.



Abbildung 9: Strahlendosis Übertragung von PDM auf ein im Herzkatheterlabor befindlichen Monitor(Basis Station)

2.6.1 Dose Aware Komponenten

2.6.1.1 Personal Dose Meter (PDM)

Plakette getragen vom Untersucher



2.6.1.2 Basis Station

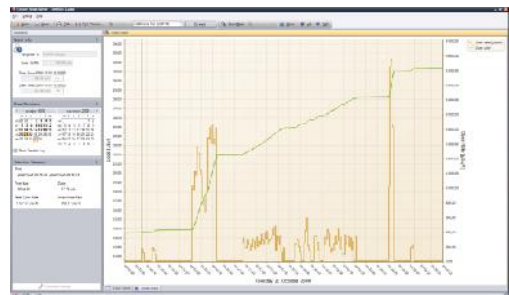
LCD Touchscreen für die Darstellung aller PDM in Echtzeit. Besitzt „dropdown“ Menüs für weiterführende Informationen. Speichert die PDM Daten.



2.6.1.3 Dose View

PC Software für Verbindung zur PDM Ladestation.

Keine Datenspeicherung. Geliefert mit Basis Station



2.7 Effektive Dosis

Um die Strahlenbelastungen verschiedener Organe vergleichen zu können, wurde der Begriff der Effektiven Dosis eingeführt, die als Maß für die Gesamtbelastung eines Menschen durch ionisierende Strahlung dient.

Die Effektive Dosis wurde nach der Methode von Niklason (Niklason et al. 1994) berechnet:

$$E=0.02 (Hos-Hu) +Hos$$

HU: Körper Dosimeter unter der Schürze

HOS: Hals Dosimeter oberhalb der Schürze

Diese Formel zeigt die Strahlenexposition der sensiblen Organe und berücksichtigt außerdem die ungeschützten Körperteile. Somit zeigt die Effektive Dosis das Gesamtrisiko einer Person unter Berücksichtigung der Strahlenempfindlichkeit jedes Organs.

Die Einheit der Effektiven Dosis ist Sievert (Sv).

2.8 Augen Dosis

Die Augen- Dosis wurde nach der Methode von (Martin 2011) geschätzt:

$$\text{Augen Dosis} = 0.75 \times \text{Halsdosis}$$

2.9 Handdosis

Die Handdosis wurde mithilfe eines Hand-Dosimeters gemessen.

2.10 Zytogenetische Analyse

Um die Auswirkung der erhaltenen Strahlendosis auf die Körperzellen zu überprüfen, wurden an zwei der teilnehmenden Untersuchern symmetrische Translokationen mithilfe der Fluoreszenz-in situ Hybridisierung (FISH) Technik und Fluoreszenz mit Giemsa-Färbung Technik bei stabilen Zellen analysiert.

Diese Untersuchungen wurden durch das Amt für Strahlenschutz (Dr. Ulrike Kulka und Dipl. Biol. Ursula Oestreicher) durchgeführt.

Die FISH Technik ist geeignet, Translokationen auf Chromosomen zu finden. Dadurch lässt sich die chronische Strahlenbelastung abschätzen, da die Translokationen über Jahre in den peripheren Lymphozyten überleben (Oestreicher et al. 2004).

Diese Technik ist aber wegen ihrer geringen Empfindlichkeit für eine Routine-Überwachung bei Personen mit einer beruflich langfristigen niedrigen Strahlendosisexposition weniger gut geeignet. Sie erfasst eine akute Exposition mit einer mittelgradigen bis höheren Strahlendosis (0.1 bis 5 Sv), die zu dizentrischen Chromosomen führen kann (Ainsbury et al. 2011).

Die Nachweisgrenze in Abhängigkeit von dem Alter der Person liegt bei 300 bis 500 mSv Lebensdauer-Dosis (Ainsbury et al. 2011).

3. Ergebnisse

Im Rahmen dieser Studie wurde die Strahlenbelastung während der katheterinterventionellen Eingriffe an den Herzkranzarterien und peripheren Gefäßen (N=284 Eingriffe) zwischen dem 07.06.2010 und 20.09.2010 bei den drei Untersuchern erfasst.

	Effektive Dosis μSv		Augen Dosis μSv		Hand Dosis μSv	
	Mittelwert \pm SD	N	Mittelwert \pm SD	N	Mittelwert \pm SD	N
Koro¹	0,4 \pm 0,7	78	6,1 \pm 10,7	84	62,3 \pm 117,4	82
PTCA²	0.7 \pm 1.6	16	8.0 \pm 9.9	16	85.4 \pm 146.0	17
PTA³ Becken	5.2 \pm 10.0	42	39.0 \pm 74.3	44	236.1 \pm 345.5	44
PTA Oberschenkel	2.8 \pm 6.5	106	22.5 \pm 30.4	109	86.7 \pm 162.8	107
PTA Unterschenkel	1.1 \pm 1.2	24	18.7 \pm 19.9	25	27.6 \pm 42.4	23
Koro, PTCA	0.5 \pm 0.9	94	6.4 \pm 10.5	100	66.2 \pm 122.2	99
PTA Becken Oberschenkel Unterschenkel	3.1 \pm 7.2	172	26.2 \pm 44.8	178	118.6 \pm 225.7	174
Gesamt	2.2 \pm 5.9	266	19.0 \pm 37.6	278	99.6 \pm 196.0	273

Tabelle 3: Strahlenexposition des Untersuchers im Katheterlabor pro Prozedur

¹ Koro: Koronarangiographie

² PTCA: Perkutane transluminale Coronarangioplastie

³ PTA: Perkutane transluminale Angioplastie

Bei allen Eingriffsarten betrug der Mittelwert der Effektiven Dosis $2.2 \pm 5.9 \mu\text{Sv}$ ($n=266$) und die mittlere Strahlendosis der Augen und der Hände war $19.0 \pm 37.6 \mu\text{Sv}$ ($n=278$) und $99.6 \pm 196.0 \mu\text{Sv}$ ($n=273$).

3.1 Einfluss der Eingriffsart

3.1.1 Effektive Dosis

Periphere Eingriffe wie im Becken, Oberschenkel und Unterschenkelbereich bedingten eine deutlich höhere Effektive Dosis als Koronarangiographien.

Im Vergleich zu Koronarangiographien war die Effektive Dosis bei Eingriffen im Beckenbereich 2.3-fach höher (95% CI: 1.7 bis 3.0, $p<0.001$), im Oberschenkelbereich 1.7-fach höher (95% CI: 1.3 bis 2.1, $p<0.001$), im Unterschenkelbereich 1.4-fach höher (95% CI: 1.1 bis 2.0, $p=0.023$) und 1.0-fach höher während PTCA in der Tabelle 4.

Die Effektive Dosis im Beckenbereich war 2.3-fach höher (95% CI: 1.5 bis 3.3, $p<0.001$), im Oberschenkelbereich 1.6-fach höher (95% CI: 1.1 bis 2.3, $p=0.008$) und im Unterschenkelbereich 1.4-fach höher (95% CI: 0.9 bis 2.1, $p<0.001$) im Vergleich zu PCI (Percutaneous coronary Intervention) in der Tabelle 4.

Die Effektive Dosis war während der Eingriffe im Beckenbereich 1.4-fach höher (95% CI: 1.1 bis 1.7, $p<0.001$) als bei den Eingriffen im Oberschenkelbereich und 1.6-fach höher (95% CI: 1.1 bis 2.2, $p<0.001$) als bei den Eingriffen im Unterschenkelbereich.

Es gab aber keinen signifikanten Unterschied zwischen Koronar-Interventionen mit oder ohne Stent und zwischen den Eingriffen im Oberschenkel und Unterschenkelbereich.

3.1.2 Augen Dosis

Bei peripheren Eingriffen war die Augen Dosis mit einer höheren Strahlenexposition im Vergleich zu Koronarangiographien verbunden. Die mittlere Augen Dosis während des Eingriffs im Beckenbereich war 2.4-fach höher (95% CI: 1.4 bis 4.1, $P=0.002$), im Oberschenkelbereich 2.0-fach höher (95% CI: 1.2 bis 3.1, $p=0.004$), im Unterschenkelbereich 2.7-fach höher (95% CI: 1.4 bis 5.1, $p=0.003$) und PTCA 1.2-fach höher (95% CI: 0.6 bis 2.6, $p<0.001$) im Vergleich zur Koronarangiographie in der Tabelle 4.

3.1.3 Hand Dosis

Die am höchsten exponierten Körperteile waren auch die Hände des Untersuchers, welche sich zeitweise sogar im Nutzstrahlenfeld befinden können. Besonders bei Peripherangiographien aufgrund des sehr eng begrenzten Arbeitsraums war die Anwendung der Röntgenschutzscheibe nicht möglich.

Die Hand Dosis war 2.3-fach höher (95% CI: 1.4 bis 3.6, $p=0.001$) während der Eingriffe im Beckenbereich, im Oberschenkelbereich 1.0-fach höher (95% CI: 0.7 bis 1.5, $p<0.001$), im Unterschenkelbereich 0.8-fach höher (95% CI: 0.5 bis 1.4, $p<0.001$) und PTCA 1.3-fach höher (95% CI: im Vergleich zur Koronarangiographie (siehe Tabelle 4).

3.1.4 Einfluss des BMI- Index

Der mittlere BMI-Index der Patienten betrug 27.0 ± 4.9 kg/m². Jede weitere Einheit von BMI des Patienten erhöhte die Effektive Dosis des Untersuchers um 3,6% (95% CI: 1.8% bis 5.4%, $p<0.001$), die Augen Dosis um 4.8% (95% CI: 1.4% bis 8.4%, $p=0.002$) und die Hand Dosis um 5.9% (95% CI: 2.9% bis 8.9%, $p<0.001$) unabhängig vom Typ des Eingriffs und von der Durchleuchtungszeit.

3.1.5 Einfluss der Durchleuchtungszeit

Die Durchleuchtungszeit betrug durchschnittlich 7.2 ± 5.7 min. Jede zusätzliche Minute der Durchleuchtungszeit erhöhte die Effektive Dosis des Untersuchers um 3.2% (95% CI: 1.7% bis 4.7%, $p < 0.001$), Augen-Dosis um 4.6% (95% CI: 1.7% bis 7.6%, $p = 0.002$) und die Hand Dosis um 8.7% (95% CI: 6.0% bis 11.5%, $p < 0.001$) unabhängig vom Typ des Eingriffs und BMI des Patienten.

Untersuchungsart	Koro	PTCA	PTA Becken	PTA Oberschenkel	PTA Unterschenkel
Effektive Dosis (95% CI, p<0.0001 bis p=0.023)					
Koro		1.0 (0.7-1.5)	2.3 (1.7-3.0)	1.7 (1.3-2.1)	1.4 (1.1-2.0)
PTCA	1.0 (0.7-1.4)		2.3 (1.7-3.0)	1.6 (1.1-2.3)	1.4 (0.9-2.1)
PTA Becken	0.4 (0.3-0.6)	0.5 (0.3-0.7)		0.7 (0.6-0.9)	0.6 (0.4-0.9)
PTA Oberschenkel	0.6 (0.5-0.7)	0.6 (0.4-0.9)	1.4 (1.1-1.7)		0.9 (0.6-1.2)
PTA Unterschenkel	0.7 (0.5-1.0)	0.7 (0.5-1.1)	1.6 (1.1-2.2)	1.2 (0.9-1.6)	
Augen Dosis (95% CI, p<0.0001 bis p=0.023)					
Koro		1.2 (0.6-2.6)	2.4 (1.4-4.1)	2.0 (1.2-3.1)	2.7 (1.4-5.1)
PTCA	0.8 (0.4-1.7)		1.9 (0.9-4.1)	1.6 (0.8-3.2)	2.2 (0.9-5.0)
PTA Becken	0.4 (0.2-0.7)	0.5/ (0.2-1.1)		0.8 (0.5-1.3)	1.1 (0.6-2.2)
PTA Oberschenkel	0.5 (0.3-0.8)	0.6 (0.3-1.3)	1.2 (0.8-1.9)		1.4 (0.8-2.4)
PTA Unterschenkel	0.4 (0.2-0.7)	0.5 (0.2-1.1)	0.9 (0.5-1.7)	0.7 (0.4-1.3)	
Hand Dosis (95% CI, p<0.0001 bis p=0.023)					
Koro		1.3 (0.7-2.5)	2.3 (1.4-3.6)	1.0 (0.7-1.5)	0.8 (0.5-1.4)
PTCA	0.7 (0.4-1.4)		1.7 (0.9-3.2)	0.7 (0.4-1.3)	0.6 (0.3-1.2)
PTA Becken	0.4 (0.3-0.7)	0.6 (0.3-1.1)		0.4 (0.3-0.6)	0.4 (0.2-0.6)
PTA Oberschenkel	1.0 (0.7-1.5)	1.4 (0.8-2.4)	2.3 (1.5-3.4)		0.8 (0.5-1.4)
PTA Unterschenkel	1.2 (0.7-2.1)	1.6 (0.8-3.3)	2.8 (1.5-5.0)	1.2 (0.7-2.0)	

Tabelle 4: Vergleich der Strahlenexposition des Operators pro Prozedur zwischen Koronare und periphere Interventionen

3.1.6 Zytogenetische Analyse

In den Blutproben von zwei Operatoren zeigten sich bei einem Operator keine dizentrische Chromosomen und bei dem anderen Operator konnten drei dizentrische Chromosomen in 1000 Zellen entdeckt werden, die aber keinen signifikanten Unterschied zum vergleichbaren normalen Niveau und keine Überschreitung der Nachweisgrenze von 100 mSv zeigten.

Mithilfe der FISH Technik konnten 3.0 ± 1.2 und 3.8 ± 1.7 Translokationen bei 1000 stabilen Zellen festgestellt werden. Da die Zahl von Translokationen in Übereinstimmung mit der Lebensarbeitszeit des Operators von etwa 10 und 20 Jahren stand, konnte kein signifikanter Unterschied zu gesundheitlichen Kontrollen aus der gleichen Altersgruppe beobachtet werden.

4. Diskussion

Bei unseren Untersuchungen konnte die Strahlenexposition des Untersuchers direkt in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie Abstand zur Röntgenquelle, Strahlenschutzeinrichtungen, Durchleuchtungszeit, Winkereinstellung des Angiographie-Gerätes gemessen werden.

Es konnte auch gezeigt werden, dass die Untersucher-Dosis nicht nur mit dem BMI des Patienten und der Durchleuchtungszeit korreliert, sondern auch mit der Art des Eingriffs.

Die Effektive Dosis war 1.4 bis 2.3-fach höher bei Eingriffen im Unterschenkel, Oberschenkel oder Beckenbereich im Vergleich zu Koronarangiographien. Ähnliche Ergebnisse konnten auch im Vergleich zur PTCA gefunden werden. Diese Erhöhung der Effektiven Dosis kann vom Abstand des Untersuchers zum Patienten, von der Häufigkeit von Schrägprojektionen, vom Abstand zur Röntgen-Röhre, von der Durchleuchtungszeit und von der Anzahl der Kinaufnahmen abhängen.

Eine erhöhte Strahlenexposition kann besonders bei komplexen, langdauernden Prozeduren und bei Prozeduren im Beckenbereich mit einem hohen Dosisflächenprodukt (DAP) auftreten (Hirschfeld 2011).

Es konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Strahlendosis des Untersuchers und dem Dosisflächenprodukt gezeigt werden (Sanchez et al. 2010). Bekannte Faktoren für das Dosisflächenprodukt sind der BMI des Patienten und die Dauer der Strahlenexposition (Bernardi et al 2000).

Die Strahlungsdosis des Untersuchers war nicht nur mit dem BMI des Patienten, der Durchleuchtungszeit und schwerwiegenden Läsionen verbunden, sondern auch mit dem Typ der Prozedur.

Bei den Eingriffen im Beckenbereich musste der Operator näher an der Läsion stehen und war somit mehr der Strahlung ausgesetzt. Diesbezüglich war die Effektive Dosis 1.4-1.6-fach höher im Vergleich zu den Eingriffen im Oberschenkel- und Unterschenkelbereich.

Bei Untersuchungen im Beckenbereich war die Strahlenexposition höher als bei Eingriffen im Oberschenkel- oder Unterschenkelbereich. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass wegen des kurzen Abstandes und der mangelnden Abschirmung mit einer erhöhten Strahlenexposition zu rechnen war.

Durch Abnahme des Abstandes vom 1 m auf 0.75 m kann sich die berufliche Strahlendosis verdoppeln (Kim und Miller 2009).

4.1 Abschätzung der jährlichen Strahlenexposition

Bei 500 bis 1000 durchgeführten Eingriffen pro Jahr (Koronarangiographien, PTCA) wurden für den Untersucher eine totale Effektive Dosis von 0.25 bis 0.5 mSv, eine Augendosis von 3.2 bis 6.4 mSv und eine Handdosis von 33.1 bis 66.2mSv abgeschätzt.

Es existiert jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen Untersuchungen mit und ohne Intervention. Der Mittelwert der Körperdosis bei Maßnahmen mit Intervention (z.B. PTCA) liegt bei 0.7 bis 1.6 μ Sv pro Prozedur und damit gut doppelt so hoch wie bei den Maßnahmen ohne Intervention (z.B. Koronarangiographie) die mit einer Dosis von 0.4 bis 0.7 μ Sv verbunden waren.

Im Gegensatz dazu wurde vor allem bei peripheren Eingriffen eine Effektive Dosis von 1.6 bis 3.1mSv, eine Augendosis von 13.1 bis 26.1mSv und eine Hand Dosis von 59.5 bis 119 mSv bei dem Operator pro Jahr ermittelt.

Die Strahlendosis außer der Augendosis war bei peripheren Eingriffen laut Empfehlung von ICRP (International Commission on Radiological Protection-ICRP) (ICRP 2007, Cousins et al. 2013) und NCRP (National Council on Radiological Protection and Measurements, United States) (NCRP 1993), wie in der Tabelle 4 dargestellt wurde, unter den empfohlenen Grenzwerten.

	Effektive Dosis	Augen Dosis	Hand/Haut Dosis
ICRP⁴	20mSv/Jahr, gemittelt über einen Zeitraum von 5 Jahren	20 mSv/Jahr, gemittelt über einen Zeitraum von 5 Jahren	500 mSv/Jahr
NCRP⁵	50 mSv/Jahr, 10 mSv x Alter/Lebensdauer	150 mSv/Jahr	500 mSv/Jahr
WHO⁶	0.5 mSv/pro Monat, weitere Untersuchungen empfohlen	5 mSv/pro Monat, weitere Untersuchungen empfohlen	15 mSv/pro Monat weitere Untersuchungen empfohlen
Deutsche Verordnung	20 mSv/Jahr	150 mSv/Jahr	500 mSv/Jahr

Tabelle 5: Empfohlene Grenzwerte bei beruflich strahlenexponierten Personen (ICRP 2007, ICRP 2013, NCRP 1993, WHO 2000, RöV 2003)

Die geschätzte jährliche Effektive Dosis des Untersuchers im Herzkatheterlabor war vergleichbar mit natürlicher Exposition (2.4 mSv/Jahr) (Picano et al. 2011).

Die berufliche Strahlendosis für den Untersucher war bei koronaren Eingriffen ähnlich der früher beschriebenen Strahlendosis von 0.5mSv/Jahr bei diagnostischen Radiologen im Jahr 1993 und lag bei 0.15 mSv/Jahr im Jahr 2001. Bei peripheren Eingriffen lag die Strahlendosis des Untersuchers von 3.6 mSv/Jahr wie vor 40 bis 50 Jahren (1960 bis 1976) bei radiologischen Technikern im Krankenhaus (Linnet et. al. 2010).

⁴ ICRP: International Commission on Radiological Protection (European Union)

⁵ NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements (United States)

⁶ WHO: World Health Organization

Wenn wir die peripheren Eingriffen wie in unserer Studie verteilen wie: etwa 65% im Oberschenkel, 25% im Becken, und 10% im Unterschenkelbereich, dann würde eine Strahlenexposition im Vergleich mit Coronarangiographien für den Körper um den Faktor 6, für die Augen um den Faktor 4 und für die Hände um den Faktor 2 erhöht sein.

Auch die Größe, das Volumen und die Menge der Strahlen-Dosis haben einen signifikanten Einfluss auf die Häufigkeiten der gefundenen Aberrationen.

FISH (Fluoreszenz in situ Hybridisierung) ist geeignet, Translokationen auf Chromosomen zu finden, ist aber wegen seiner Unempfindlichkeit für eine Routine Überwachung bei Personen mit einer beruflich langfristigen niedrigen Strahlen Exposition eher nicht geeignet. Bei einer akuten Exposition mit einer mittleren bis höheren Strahlendosis (0.1 bis 5 Sv), kann die Anzahl der dizentrischen Chromosomen soweit erhöht sein, dass mit FISH eine Abschätzung der Strahlendosis möglich ist (Ainsbury et al. 2011).

Aus diesem Grund ist es nötig, eine Studie mit einer höheren Untersucherzahl zu initiieren, um zu zeigen, ob ein Zusammenhang zwischen Chromosomen Aberrationen und der beruflichen Strahlenexposition bei verschiedenen Eingriffen im Herzkatheterlabor besteht.

4.2 Gesundheitsrisiken

4.2.1 Körper

Die abgeschätzte Effektive Dosis ist bei dem Operator laut Empfehlungen nicht überschritten.

Ob sehr kleine Dosen auch schädliche Effekte haben, oder ob es einer gewissen Schwellendosis bedarf, bevor die Schäden auftreten, ist noch unklar, da die meisten Studien auf Befunden aus Expositionen mit mittlerer bis hoher Dosis beruhen.

Die Schwellendosis ist definiert als geschätzte Dosis für die 1%-ige Inzidenz einer nachweisbaren Gewebereaktion und bezieht sich auf deterministische Wirkungen wie Entzündung, Ulzeration oder Nekrose, welche bei Patienten verursacht werden können.

Die Beziehung zwischen langfristiger Strahlenexposition des Untersuchers mit einer niedrigen Dosis und DNA Mutationen, Krebsrisiko, sowie Verschlechterung der Gewebe, welche sich bei dem Operator entwickeln können, ist noch unklar (Hendry 2012).

Es wurde von einer verbesserten Antioxidantien Abwehr durch Überproduktion von Glutathion in Erythrozyten und Caspase 3 in Lymphozyten bei einer chronischen Strahlenexposition mit einer niedrigen Dosis bei interventionellen Kardiologen berichtet ((Russo et al. 2012).

Je länger das Zeitintervall zwischen jeder Bestrahlung ist, desto effektiver ist die biologische Reparatur (Hendry 2012).

Die Ergebnisse der 15 Länder Studie (Strahlungsmitarbeiter, n= 407,391) zeigten ein relatives Krebsrisiko um ca. 2% bei den Mitarbeiter mit einer mittleren Strahlenexposition von 19.4 mSv (Cardis et al. 2007).

Es wurde zusätzlich ein erhöhtes Krebsrisiko von 3% über 5 Jahre bei Patienten nach akutem Herzinfarkt mit einer Strahlenexposition von 10 mSv festgestellt (Eisenberg et al. 2011).

Vor kurzem wurde über mehrere Fälle von Gehirnkrebs auf der linken Seite des Kopfes bei den interventionellen Kardiologen berichtet, die 20 bis 30 mSv jährliche Kopf Dosis erhalten haben (Roguin et al. 2012).

Im Gegenteil dazu, war es nicht möglich, eine Erhöhung des Krebsrisikos bei den Überlebenden in Japan nach den Atombomben bei einer Strahlenexposition von weniger als 100mSv zu identifizieren.

Das Risiko vererbbarer Effekte durch Strahlenexposition ist viel niedriger als die von Krebs. Solche Wirkungen sind beim Menschen bisher nicht demonstriert worden (Mettler 2012).

Zusammenfassend ist anzunehmen, dass das allgemein geschätzte Krebsrisiko von einer akuten Einzeldosis von 100mSv bei 1% liegt [Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR VII-Phase 2. 2006)].

Im Fall einer niedrigen chronischen Strahlendosis, ist es empfehlenswert, das geschätzte Risiko durch den Einsatz eines „Dosis und Dosisleistungseffektivitätsfaktor (DDREF)“ um 1.5 (BEIR VII Committee, NCRP) oder 2.0 (ICRP) zu reduzieren.

4.2.2 Augen und Hände

4.2.2.1 Augen

Während peripherer Eingriffe wurde eine Augen-Dosis des Operators bis 26mSv/Jahr erreicht, eine Überschreitung der zuletzt festgelegten ICRP Empfehlung für die Dosisgrenze von 20 mSv/Jahr. Jedoch NCRP hat diese Empfehlung bisher nicht verfolgt (Siehe Tabelle 5).

Die Strahlenexposition wurde als Hauptursache für Schäden und Mutationen in dem Keimbereich des Linsenepithels, die zu Katarakt Entwicklungen führen können, vermutet (Kleiman 2012).

Aus diesem Grund ist bei, Verwendung einer Bleiglasbrille mit seitlichem Schutz mit einer Dosis Reduktion um den Faktor 10 besonders bei peripheren Prozeduren zu rechnen.

4.2.2.2 Hände

Deutlich höhere Dosen wurden natürlich an den Händen des Untersuchers beobachtet. Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass eine geschätzte jährliche Dosis der Hände von 33.1 bis 119 mSv/Jahr zu erwarten ist.

Auch hier führt eine Hochrechnung auf die zu erwartende Jahresdosis von 119mSv/Jahr nicht zu einer Überschreitung geltender Grenzwerte (500mSv/Jahr).

Generell ist noch in Betracht zu ziehen, dass die Einzelwerte von Untersuchung zu Untersuchung naturgemäß sehr stark streuen.

Vielleicht sollten Schutzmaßnahmen häufiger in Betracht gezogen werden, um vor allem bei Eingriffen im Beckenbereich die Strahlenexposition zu reduzieren. Außerdem kann die Bleiglasscheibe über und unter dem Herzkatheter-Tisch die Strahlenexposition in der Hand um den Faktor 29 reduzieren (King et al. 2002).

4.3 Studie Einschränkungen

In unserem Zentrum wurden die Daten von drei Operatoren ermittelt. Weitere multizentrische Zentren, mit einer höheren Anzahl von Teilnehmern sind erforderlich, um den Zusammenhang zwischen den Eingriffsarten und der Strahlenexposition des Operators genauer untersuchen zu können.

5. Zusammenfassung

Mit Hilfe eines neuen Verfahrens „Dose Aware System“ (Philips) konnte die Strahlenexposition des Operators erfasst werden. Die drei Operatoren waren mit jeweils drei PDMs (Personal Dose Meter) ausgerüstet und haben davon eines am Handgelenk, eines unter der Bleischürze und eines am Hals oberhalb der Bleischürze getragen, um die Strahlendosis zu erfassen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass die Augen-Dosis des Operators während peripherer Eingriffe bis zu 26 mSv/Jahr erreichen konnte, eine Überschreitung der zuletzt festgelegten ICRP (International Commission on Radiological Protection, European Union) Empfehlung für die Dosisgrenze von 20 mSv/Jahr. Jedoch sind NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements, United States Union), WHO (World Health Organization) und die Deutsche Verordnung dieser Empfehlung bisher nicht gefolgt.

Höhere Dosen wurden natürlich auch an den Händen des Untersuchers beobachtet. Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass eine geschätzte jährliche Dosis der Hände von 33.1 bis 119 mSv/Jahr zu erwarten ist. Auch hier führt eine Hochrechnung auf die zu erwartende Jahresdosis laut Empfehlungen von ICRP, NCRP, WHO und Deutsche Verordnung nicht zu einer Überschreitung geltender Grenzwerte.

Unabhängig vom Patienten BMI oder der Durchleuchtungszeit ist bei peripheren Eingriffen mit einer höheren Strahlenexposition des Operators im Herzkatheter-Labor als bei koronaren Eingriffen zu rechnen.

Die Ergebnisse der Untersuchung belegen, dass sich auch bei den langen Durchleuchtungszeiten im Herzkatheter-Labor eine Tätigkeit für das Personal während der komplexen Eingriffe wie der komplexen PTCA oder der komplexen PTA unter gesetzlichen Grenzwerten realisieren lässt.

Obwohl in unserer Studie die empfohlene Strahlendosis nicht überschritten wurde, kann aber die Strahlenexposition abhängig von der Art und Häufigkeit der Eingriffe, Durchleuchtungszeit und BMI vom Patienten, eine biologische Wirkung ausüben.

Daher sollten alle Strahlenschutzeinrichtungen, Filterung, gepulste Durchleuchtung und niedrige Bildrate, die zu einer Reduktion der Strahlenexposition führen, verwendet werden.

In Anbetracht der durchgeführten Studie ist es festzustellen, dass das Strahlenumfeld in einem Herzkatheterlabor durchaus einer hohen Arbeitsplatzdosis entspricht. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, dass die Regelungen des Strahlenschutzes konsequente Anwendung finden. Nur dann ist die Tätigkeit in diesem Umfeld mit akzeptablen Expositionen verbunden.

6. Abkürzungen

BEIR:	Biological Effects of Ionizing Radiation
BMI:	Body Mass Index
BZW:	Beziehungsweise
Cu:	Kupfer
DAP:	Dosisflächenprodukt
DDREF:	Dosis und Dosisleistungseffektivitätsfaktor
DNA:	Desoxyribonukleinsäure
E:	Effektive Dosis
Koro	Koronarangiographie
KST:	Kernspintomographie
KV:	Kilovolt
HK2:	Herzkatheterlabor 2
HK3:	Herzkatheterlabor 3
HOS:	Hals Dosimeter oberhalb der Schürze
HU:	Körper Dosimeter unter der Schürze
Gy: Gray-	Die Einheit für Energiedosis
ICRP:	International Commission on Radiological Protection
LAO Projektion:	Left anterior oblique Projection
LCA:	Hauptstamm der linken Koronararterie
LCD:	Liquid Crystal Display

LIH:	Last-Image Hold
mA:	Milliamper
mm:	Millimeter
MRT:	Magnetresonanztomographie
mSv:	Mili Sievert
NCRP:	National Council on Radiation Protection and Measurements
Pb-Äq:	Bleiäquivalent
PCI:	Perkutane Coronary Intervention
PTA:	Perkutane transluminale Angioplastie
PTCA:	Perkutane transluminale coronare Angioplastie
PDM:	Produktdatenmanagement
QS- RL:	Qualitätssicherungsrichtlinie
RAO Projektion:	Right anterior oblique Projection
RCA:	Die rechte Koronararterie
RÖV:	Röntgensverordnung
SD:	Standard Deviation (Abweichung)
SD:	Strahlendosis
SV- Sievert:	Die Einheit der Äquivalentdosis
SV- RL:	Sachverständigenrichtlinie
StrISchV:	Strahlenschutzverordnung
UNSCEAR:	United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation

WHO: World Health Organization

z.B : zum Beispiel

7. Literatur

Ainsbury EA, Bakhanova E, Barquinero JF, et al. (2011): Review of retrospective dosimetry techniques for external ionizing radiation exposures. *Radiat. Prot. Dosimetry*; 147: 573-92.

Angerstein W, Gursky S, Hegewald H, (1982): *Grundlagen der Strahlenphysik und der radiologischen Technik in der Medizin*. 3. Aufl. Leipzig: Thieme-Verlag.

Aufrichtig R, Thomas CW, Xue P, Wilson DL, December (1994): *Journal of the Optical Society of America A Optics, Image Science und Vision*. 11(12): 3167-76 (Pub Med).

Balter S, Sones F.M and Brancato R (1978): Radiation exposure to operator performing cardiac angiography with U-arm systems. *Circulation* 58, 925–932

Bernardi G, Padovani R, Morocutti G, et al. (2000): Clinical and technical determinants of the complexity of percutaneous transluminal coronary angioplasty procedures, analysis in relation to radiation exposure parameters. *Catheter Cardiovasc. Interv.*; 51: 1-9, Discussion 10.

Bundesamt für Strahlenschutz (2003): Bekanntmachung der diagnostischen Referenzwerte für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen vom 10. Juli 2003. *Bundesanzeiger* 143:17503

Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, et al. (2007): The 15 Country Collaborative Study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation-related cancer risks. *Radiat. Res.*; 167: 396-416.

Christodoulou EG, Goodsitt MM, Larson SC, Darner KL, Satti J, Chan HP. (2003): Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter. *Med Phys.*; 30:1033–1038. doi: 10.1118/1.1573207. (PubMed)

Ciraj-Bjelac O, Rehani MM, Sim KH, Liew HB, Vano E, Kleiman NJ, (2010): Risk for radiation-induced cataract for staff in interventional cardiology: is there reason for concern? *Catheter Cardiovasc Interv.*; 76:826–34. (PubMed)

Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (2006): BEIR VII-Phase 2. Washington DC: National Academies Press.

Cologne JB, Preston DL (2000): Longevity of atomic bomb survivors, Lancet; 356: 303-307

Cousin AJ, Lawdahl RB, Chakraborty DP, Koehler RE, (1987): The case for radioprotective eyewear/facewear. Practical implications and suggestions. Invest Radiol.; 22 :688–692 (PubMed)

Cousins C, Miller DL, Bernardia G, (2013): ICRP publication 120; radiological Protection in cardiology. Ann ICRP 2013; 42: 1-125.

De Jager M, van Noort J, van Gent DC, Dekker C, Kanaar R, Wyman C, (2001): Human Rad50/Mre11 is a flexible complex that can tether DNA ends. Mol Cell 8: 1129-1135

Detorie N, Mahesh M, Schueler BA, (2007): Reducing occupational exposure from fluoroscopy. J Am Coll Radiol 4:335–337

(DIN 6812) (2002): Medizinische Röntganlagen bis 300 kV – Regeln für die Auslegung des baulichen Strahlenschutzes. Berlin: Beuth Verlag, Juni 2002

Eisenberg MJ, Afilalo J, Lawler PR, Abrahamowicz M, Richard H, Pilote L, (2011): Cancer Risk related to low-dose ionizing radiation from cardiac imaging in patients after acute myocardial infarction. CMAJ; 183: 430-6.

Eder H, (1995): Verbesserung des Untersucherstrahlenschutzes in der Angiographie und der interventionellen Radiologie durch Verwendung von Dauereinrichtungen nach § 21 RöV. Radiologe 35: 156-161.

Ewen K, (1994): Reduzierung der Strahlenexposition für Patient und Untersucher bei interventionellen kardiologischen Untersuchungen, Med. Physik 94, S. 254.

Ewen K, (1995): Reduzierung der Strahlenexposition in der interventionellen Kardiologie. Strahlenschutzpraxis 1 Heft 4. 25-28.

Ewen K, Hannig P, Lauber I, Schienbein K, (1997): Strahlenbelastung an Herzkatheterarbeitsplätzen. EDITA 1, Landesanstalt für Arbeitsschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

(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).

Fuchs M, Modler H, Schmid A, Dumont C, Stürmer KM, (1999): Messung der intraoperativen Strahlenexposition des Unfallchirurgen – Messung an Auge, Schilddrüse und Hand mit hoch-empfindlichen Thermolumineszenzdetektoren. Unfallchirurg; 102: 371-6.

Hamm C.W, Bonzel T, Erbel R, (2008): Diagnostische Herzkatheteruntersuchung, Clin. Res Cardiol. 97:475-512.

Hamm CW, Bösenberg H, Brennecke R et al (2001): Leitlinien zur Einrichtung und zum Betreiben von Herzkatheterräumen (1. Neufassung). Z Kardiol 90:367–37

Hendry JH. (2012): Radiation biology and radiation protection. Ann ICRP; 41: 64-71.

Hirshfeld JW Jr, Balter S, Brinker JA et al. (2005): 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. Circulation 111:511–532

Hirshfeld JW Jr. *Circ. Cardiovasc. Interv.* (2011): Radiation exposure in cardiovascular medicine: how do we protect our patients and ourselves? 4:216-8.

ICRP (2007): The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Ann ICRP*; 37: 1-332.

ICRP (1991): Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford (Deutsche Übersetzung: Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission 1990.

Jung H, (1998): Strahlenrisiken In: Ewen K, *Moderne Bildgebung*, S. 24-44. G. Thieme, Stuttgart.

Jung H, (1991): Die Risiken der Röntgendiagnostik. *Röntgenstrahlen* 66: 46-53.

Jung H, Strahlenrisiko. *Fortschr. Röntgenstr.* (1995); 162 (2): 91-8.

Kauffmann, Günter W. *Radiologie*, (2006): 3.Aufl. Urban&Fischer.

Folkerts K.-H, Münz A, Jung S, (1997): *Clinical Research in Cardiology*, Volume 86, Issue 4; 258-263.

Kim KP, Miller DL, (2009): Minimising radiation exposure to physicans performing fluoroscopically guided cardiac catheterization procedures: a review *Rariat. Prot. Dosimetry*; 133: 227-33.

King JN, Champlin AM, Kelsey CA, Tripp DA, (2002): Using a sterile disposable protective surgical drape for reduction of radiation exposure to interventionalists. *AJR Am J Roentgenol.*;178:153-7.

Kleiman JN. Radiation cataract. *Ann ICRP* (2012): 41:80-97.

Klein LW, Miller DL, Balter S et al (2009): Occupational health hazards in the interventional laboratory: time for a safer environment. *J Vasc Interv Radiol* 20:147–152 quiz 153.

Krieger H, (2002): Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. Band 1, Grundlagen. 5. Aufl. Stuttgart, Leipzig: Teubner-Verlag.

Krieger Hanno, (2007): Grundlagen der Strahlenphysik und des Strahlenschutzes. 2.Aufl. B.G. Teubner Verlag.

Kuon E, Kaye AD, (2002): Radiation exposure in invasive cardiology – an ongoing challenge for cardiologists, industry and control organs, Business Briefing: Global healthcare.

Kuon E, Schmitt M, Dahm JB, (2002): Significant reduction of radiation exposure to operator and staff during cardiac interventions by analysis of radiation leakage and improved lead shielding. Am J Cardiol 89:44–49.

Kuon E, Glaser C, Dahm JB, (2003): Effective techniques for reduction of radiation dosage to patients undergoing invasive cardiac procedures, The British Journal of Radiology, 76:406-413.

Kuon E, Birkel J, Schmitt M, Dahm JB. (2003): Radiation exposure benefit of a lead cap in invasive cardiology. Heart. 2003; 89:1205–10. (PubMed)

Kuon E, Dahm JB, Empen K, Robinson DM, Reuter G, Wucherer M, (2004b): Less irradiating angulations in invasive cardiology. J Am Coll Cardiol 44: 1420-1428.

Kuon E, Dahm JB, Robinson DM, Empen K, Günther M, Wucherer M, (2005a): Radiation-reducing planning of cardiac catheterisation. Z Kardiol 94(10): 663-673.

Kuon E, Robinson DM, Dahm JB (2005b): Fluoroscopy time – an overestimated factor for patient radiation exposure in invasive cardiology. Fortschr Röntgenstr 177: 812-817.

Gatti RA, (2001): The inherited basis of human radio sensitivity. *Acta Oncol*; 40 (6): 702-711.

Larrazet F, Dibie A., Philippe F, Palau R, Klausz R, Laborde F, (2003): Factors influencing fluoroscopy time and dose-area product values during ad hoc one-vessel percutaneous coronary angioplasty. *Br. J. Radiol.* 76, 473–477.

Laubenberger T, Laubenberger J, (1999): *Technik der medizinischen Radiologie – Diagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz für Ärzte, Medizinstudenten und MTRA.* 7.Aufl. Köln: Deutscher Ärzte Verlag.

Linnet MS, Kim KP, Miller DL, Kleinerman RA, Simon SL, Berington de Gonzalez A, (2010): Historical review of occupational exposures and cancer risks in medical radiation workers. *Radiat. Res.*; 174: 793-808.

Loewenhardt B, Müller E, (1997): *Bildgebende Diagnostik Technik, Anatomie, Pathologie.* Darmstadt: Minerva-Verlag.

Maeder M, Brunner-La Rocca HP, Wolber T, et al. (2006): Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. *Cath Cardiovasc Interv.*; 67: 18–23. (PubMed)

Marshall NW, Faulkner K, Clarke P. (1992): An investigation into the effect of protective devices on the dose to radiosensitive organs in the head and neck. *Br J Radiol.*; 65: 799–802. (PubMed)

Martin CJ, (2011): Personal dosimetry for interventional operators: when and how should monitoring be done? *Br J Radiol.* 84; 639-48.

McElhinny S, Snowden C, McCarville J, Ramsden DA, (2000): Ku recruits the XRCC4-ligase-IV complex to DNA ends. *Mol Cell Biol* 20: 2966-3003.

Mettler FA, (2012): Medical effects and risks of exposure to ionizing radiation. *J. Radiol. Prot.*; 32: N9-13.

Moore WE, Ferguson G, Rohrmann C, (1980): Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Med Phys.*; 7: 8–12. (PubMed)

Nakagawa S, Schielzeth H, (2013): A General and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. *Meth. Ecol. Evol.* 4: 133-42.

NCRP (1993): Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Report No. 116. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements.

Niklason LT, Marx MV, Chan HP, (1994): The Estimation of occupational effective dose in diagnostic radiology with two dosimeters. *Health Phys.*, 67; 611-5.

Oestreicher U, Braselmann H, and Stephan G, (2004): Cytogenetic analyses in peripheral lymphocytes of persons living in houses with increased levels of indoor radon concentrations. *Cytogenet Genome Res.* 104; 232-6.

Pitney, M. R, Allan R. M, Giles R. W, Mclean D, Mccredie, M, Randell T, and Walsh W. F, (1994): Modifying fluoroscopic views reduces operator radiation exposure during coronary angioplasty. *J. Am. Coll. Cardiol.* 24, 1660–1663.

Pratt T. A, and Shaw A. J, (1993): Factors affecting the radiation dose to the lens of the eye during cardiac-catheterization procedures. *Br. J. Radiol.* 66, 346–350.

Preston DL, Kato H, Kopecky KJ, Fujita, S: Life Span Study Report 10, Part 1, (1987): Cancer Mortality among A-bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki, 1950-1982. Technical Report RERF TR 1-86. Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima.

Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, Kamada N, Dohy H, Matsuo T, Nonaka H, Thompson DE, Soda M, Mabuchi K, (1994): Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Part III: Leukemia, Lymphoma, and Multiple Myeloma, 1950-87, RERF Special Report, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima.

Picano E, Vano E, (2011): The Radiation issue in cardiology: the time for action is now. *Cardiovasc. Ultrasound* 2011;

Radiologic and Nuclear Medicine Studies in the United States and Worldwide (2009): Frequency, Radiation Dose and Comparison with Other Radiation Sources-1950–2007, Fred A. Mettler Jr, et al., Radiology, November 2009: Report of High Level and Expert Group on European Low Dose Risk Research, European Communities.

Reiser Maximilian, (2006): Duale Reihe – Radiologie. 2.Aufl. Georg Thieme Verlag.

Richtlinie für die technische Prüfung von Röntgeneinrichtungen und Störstrahlen www.bmu.de/strahlenschutz/downloads/doc/5765.php

Richtlinie zur Durchführung der Qualitätssicherung bei Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung oder Behandlung von Menschen www.bmu.de/strahlenschutz/downloads/doc/6395.php

Roguin A, Goldstein J, Bar O, (2012): Brain tumors among interventional cardiologists a cause for alarm? Report of four new cases from two cities and a review of the literature. *Eurintervention*; 7: 1081-6.

Ron E, Preston DL, Mabuchi K, Thompson DE, Soda M, (1994): Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Part IV: Comparison of Cancer Incidence and Mortality. RERF-Special Report, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima,

RöV, (2002): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen.

RöV, (2003): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Regulation for the protection against harm caused by X-rays): Röntgenverordnung (German X-ray regulation)

Russo GL, Tedesco I, Russo M, Cioppa A, Andreassi MG, Picano E, (2012): Cellular adaptive response to chronic radiation exposure in interventional cardiologists. *Eur. Heart J*; 33: 408-14.

Sanchez R, Vano E, Fernandez JM, Gallego JJ, (2010): Staff radiation doses in a real-time display inside the angiography room. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.*; 33: 1210-4.

Schmidt Th, Stieve F-E, (1996): *Digitale Bildgebung in der Diagnostischen Radiologie, Bildqualität-Strahlenexposition. Tagungsband 1. Auflage, Berlin: H. Hoffmann-Verlag.*

Seifert H, El-Jamal A, Roth R, Urbanczyk K, Kramann B, (2000): Reduzierung der Strahlenexposition von Patienten bei ausgewählten interventionellen und angiographischen Maßnahmen. *Röfo.*, 172 (12): 1057-64.

Shimizu Y, Kato H, Schull WJ: Life Span Study Report 11, Part 2, (1988): Cancer Mortality in the Years 1950 - 1985 Based on the Recently Revised Doses (DS86). RERF TR-88, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima.

Schmitz-Feuerhake, I (2009): Hiroshima, Nagasaki und die Atomkraft - strahlende Folgen, Vortrag in Freiburg, <http://www.netzwerk-regenbogen.de/akwstr090708.html>

Schonfeld S. J, Lee C, de González A. B, (2011), „Medical exposure to radiation and thyroid cancer: *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 23(4), 244—250.

Shortt CP, Al-Hashimi H, Malone L, Lee MJ (2007): Staff radiation doses to the lower extremities in interventional radiology. *CardioVasc. Interv. Radiol.* 30: 1206–1209.

Selzer E, Hebar A, (2012): Biological effect and tumor risk of diagnostic x-rays. The “ war of the theories”. *Der Radiologie*; 52: 892-7.

(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)

Thompson DEX, Mabudi K, Ron E, Soda M, Tokunara M, Ochikubo S, Sugimoto S, Lkeda T, Terasaki M, Rzulni S, Pxston DL, (1994): Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Part II: Solid lbmon, 1958-87. RERF-Special Report, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima.

Thornton RH, Altamirano J, Dauer L, :Comparing strategies for IR eye protection. J. Vasc. Interv. Radiol. (2009); 20:S52–S53.

UNSCEAR (2008) Report, New York (2011): Sources and effects of Ionizing radiation. Band 2. Annex D – Health effects due to radiation from the Chernobyl accident.

Vano et al. (1998): Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimized interventional radiology laboratories. The British Journal of Radiology, 728 – 733

Vano E, Gonzalez L, Guibelalde E, Fernandez J. M, and Ten J. I, (1998): Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. Br. J. Radiol. 71, 954–960.

Vano E, Gonzalez L, Fernandez JM, Prieto C, Guibelalde E, (2006): influence of patient thickness and operation modes on occupational and patient radiation doses in interventional cardiology. Rad. Prot. Dosim.;118: 325–30.

Vano E, Gonzalez L, Fernández JM, Haskal ZJ, (2008): Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. Radiology; 248 :945–953. (PubMed)

Vogt Hans-Gerrit, Schultz Heinrich, (2010): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, 5 Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien.

Von Boetticher H, Meenen C, Lachmund J, Hoffmann W, Engel HJ, (2003): Strahlenexposition des Personals im Herzkatheterlabor; Z. Med. Phys.; 13: 251-256.

Von Boetticher H, Lachmund J, Hoffmann W. (2007): Wie konservativ ist die Abschätzung der effektiven Dosis durch die amtliche Personendosimetrie für das Personal in der Röntgendiagnostik? Fortschr Röntgenstr.; 179: 728-732.

Von Boetticher H, Lachmund J, Loe HK, Hoffmann W, Poppe B., (2008): Recommendations of the ICRP change basis for estimation of the effective dose: What is the impact on radiation dose assessment of patient and personnel? Fortschr Röntgenstr.; 180: 391-395.

Wagner LK, Mulhern OR, (1996): Radiation-attenuating surgical gloves: effects of scatter and secondary electron production. Radiology 200:45–48.

Walker JR, Corpina RA, Goldberg J, (2001): Structure of Ku heterodimer bound to DNA and its implications for double strand Break repair. Nature 412: 607-614.

Watson L. E, Riggs M. W, and Bourland P. D, (1997): Radiation exposure during cardiology fellowship training. Health Phys. 73, 690–693.

Whitby M, and Martin C. J, (2005): A study of the distribution of dose across the hands of interventional radiologists and cardiologists. Br. J. Radiol. 78, 219–229.

Wholey M. H, (1974): Clinical dosimetry during angiographic examination comments on coronary arteriography. Circulation 50, 627–631.

WHO (2000): Efficacy and Radiation Safety in International Radiology. Geneva Switzerland: World Health Organization.

Zeitschrift für Kardiologie Band 91, Heft 6, (2002), Steinkopff Verlag.

Weitere Internetadressen:

www.ssk.de (Strahlenschutzkommission)

www.bfs.de (Bundesamt für Strahlenschutz)

www.hamburg.de/Strahlenschutz

„Themen rund um den Strahlenschutz“

„Erhalt der Strahlenschutzfachkunde und Strahlenschutzkenntnisse“

Download „Erhalt der Strahlenschutzfachkunde und Strahlenschutzkenntnisse“

8. Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater Herr Professor Mathey, der mir dieses Thema ermöglicht hat und mit seinem Fachwissen zur Seite stand.

Meiner Frau danke ich von ganzem Herzen, die mir mit zahlreichen Tipps die Arbeit am Computer und damit die Fertigstellung meiner Doktorarbeit unendlich erleichterte.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern, ohne die das Studium und die Dissertation niemals möglich gewesen wären.

Ganz großer Dank geht an Professor Schofer und Frau Dr. Bijuklic. Diese Arbeit wäre ohne ihre Hilfe nicht möglich gewesen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Burhan Mehmedi für die hilfreichen Tipps und unterstützenden Beistand.

9. Lebenslauf

Der Lebenslauf entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

Der Lebenslauf entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

10. Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: