

Aus dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie
(Prof. Dr. med. M. Knauth)
im Zentrum Radiologie
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Eine Phantomstudie zur Strahlenexposition des Untersuchers bei
Rotationsaquisitionen mit einer Flachdetektor-Angiographie-Anlage**

INAUGURAL – DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Tatiana Friedrichs geb. von Keil
aus
Bielefeld

Göttingen 2014

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. H. K. Kroemer

I. Berichterstatter/In: Prof. Dr. med. M. Knauth

II. Berichterstatter/In: Prof. Dr. med. R.P. Virsik-Köpp

III. Berichterstatter/In: Prof. Dr. med. dent. R. Mausberg

Tag der mündlichen Prüfung: 24.07.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation und Fragestellung.....	1
1.2	Grundlagen	2
1.2.1	Strahlenschutzgrundsätze.....	2
1.2.2	Gesetzliche Verankerung des Strahlenschutzes.....	4
1.2.3	Messgrößen im Strahlenschutz.....	6
1.2.4	Strahlenschutzvorkehrungen.....	7
1.2.5	Flachdetektor-Angiografieanlagen	8
2	Material und Methoden.....	10
2.1	Material	10
2.1.1	Angiographiesystem.....	10
2.1.2	Strahlenschutzvorkehrungen.....	12
2.1.3	Alderson-Rando-Phantom.....	14
2.1.4	Dosimeter.....	15
2.2	Methodik	15
2.2.1	Versuchsaufbau Rotationsangiografie des Kopfes.....	15
2.2.2	Versuchsaufbau DSA des Kopfes	19
2.2.3	Grafikprogramm und statistische Auswertung	20
3	Ergebnisse	21
3.1	Rotationsangiografie des Kopfes	21
3.1.1	Ermittlung von Dosis-Transferfaktoren.....	21
3.1.2	Messergebnisse für die Ortsdosis an definierten Raumpunkten	24
3.2	DSA des Kopfes	28
3.2.1	Messergebnisse für die Ortsdosis an definierten Raumpunkten	28
4	Interpretation und Analyse der Ergebnisse.....	30
4.1	Ortsdosis bei der Rotationsangiografie	30
4.2	Ortsdosis bei der DSA	33
4.3	Vergleich von Rotationsangiografie und DSA	36
5	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	38
5.1	Überschreitung der gesetzlichen Dosisgrenzwerte	38
5.2	Notwendigkeit und Praktikabilität des gerätebezogenen Strahlenschutzes ...	42

5.3	Strahlenexposition der Augenlinse	45
5.4	Strahlenexposition der Schilddrüse	47
5.5	Strahlenexposition der Gonaden	48
5.6	Anwendungen mit häufiger Strahlenüberexposition.....	49
5.7	Notwendigkeit der Personendosimetrie	50
5.8	Zusätzliche Möglichkeiten der Dosisreduktion	52
5.8.1	Zusatzfunktionen an der Angiografieanlage.....	52
5.8.2	Engere Indikationsstellung	53
5.8.3	Problematik der Filmkontrolle in der digitalen Technik	54
5.8.4	Weiter- und Fortbildung in der interventionellen Radiologie.....	54
5.8.5	Persönlicher Strahlenschutz.....	56
5.9	Empfehlung.....	56
6	Zusammenfassung.....	58
7	Literaturverzeichnis	59

1 Einleitung

1.1 Motivation und Fragestellung

In der Abteilung Neuroradiologie (Direktor: Prof. Dr. med. Michael Knauth) der Universitätsmedizin Göttingen steht seit 2005 ein hochmodernes Zweiebenen-C-Bogen-System mit neuester Detektor-Technologie für Angiografie und Interventionen zur Verfügung. Das System besteht aus je einem boden- und einem deckenmontierten C-Bogen mit modernen, digitalen Flachdetektoren anstelle der bisher üblichen Bildverstärker. Der allgemein anerkannte Vorteil dieser Detektortechnologie besteht darin, dass es zu keiner geometrischen Verzerrung kommt, dass eine bessere Kontrastauflösung erzielt wird und dass ein größeres, weil rechteckiges Sichtfeld (engl. Field Of View, FOV) vorhanden ist. Das System ist auch für eine computertomografische Bildgebung geeignet. Dabei werden die Aufnahmen einer Rotationsangiografie für eine Rekonstruktion des aufgenommenen Volumens genutzt. Die CT-ähnlichen Bilder werden während der Intervention im Angiografieraum generiert, so dass der Patient nicht mehr an einen Computertomografen umgelagert werden muss.

Interventionelle radiologische Maßnahmen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie stets mit Handlungen des Arztes und des Assistenzpersonals am oder mindestens in unmittelbarer Nähe des Patienten verbunden sind. Neben der Wahl der Durchleuchtungs- bzw. Aufnahmeparameter, der Dauer der Untersuchung und der Schwierigkeit des Falles hat die Position im Untersuchungsraum Einfluss auf die Strahlenexposition des Personals, insbesondere des Arztes.

Seit Einführung der ersten Zweiebenen-Flachdetektor-Angiographiesysteme liegen zwar einige Studien über die Strahlenexposition der Patienten vor, über die Strahlenexposition des am Patienten tätigen Personals gibt es jedoch nur vergleichsweise spärliche Informationen (Eder 1995). Primäres Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, in einer experimentellen Phantomstudie die Strahlenexposition des an einer biplanen Angiografieanlage mit Flachdetektor-Technologie beschäftigten Personals zu ermitteln.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung sollen Verhaltensregeln für die tägliche Praxis abgeleitet werden. Insbesondere soll geklärt werden, wie stark durch die Wahl des Standortes die Strahlenexposition des Untersuchers und des übrigen im Untersuchungsraum anwesenden Personals verringert werden kann. Desweiteren soll aufgezeigt werden, wie wirksam die gerätebezogenen Strahlenschutzvorkehrungen sind und wie weit sie durch persönliche Schutzmittel ergänzt werden müssen. Ein besonderes Augenmerk soll dabei auf die Teilkörperdosen an Kopf und Hals gelegt werden, da insbesondere die Augenexposition häufig unterschätzt wird.

Nach dieser einleitenden Darlegung von Motivation und Fragestellung folgt zunächst ein Abschnitt mit den Grundlagen des Strahlenschutzes und der Flachdetektor-Technologie. In Kapitel 2 werden Materialien und Methoden der Arbeit vorgestellt. Dabei werden die untersuchte Angiografieanlage, die vorhandenen Strahlenschutzvorkehrungen, das Phantom zur Nachbildung des Patienten, das Dosimetersystem und der Versuchsaufbau erläutert. Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Ergebnisse, Interpretation der Ergebnisse und ihre Diskussion in einem größeren Zusammenhang folgen in den Kapiteln 3,4 und 5. Eine Zusammenfassung und ein Literaturverzeichnis bilden dann die zwei abschließenden Kapitel der Arbeit.

1.2 Grundlagen

1.2.1 Strahlenschutzgrundsätze

Strahlenschutz umfasst alle Anforderungen, organisatorischen, baulichen, technischen Maßnahmen, Mittel, Verfahren und Methoden, durch die bei Menschen, Tieren, anderen biologischen Objekten und Sachgütern die Wirkungen ionisierender Strahlung vermieden oder verringert werden (DIN 6814-5 2008).

Die weltweit geltenden Prinzipien des Strahlenschutzes lassen sich nach den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP = International Commission on Radiological Protection; Gründung 1928; Gremium von Vertretern der einzelnen nationalen radiologischen Gesellschaften, welche Empfehlungen für die Strahlen-

schutzgesetzgebung erarbeiten) in drei Grundsätzen zusammenfassen (Schröder und Schröder 2007):

Grundsatz der Notwendigkeit und Rechtfertigung

In der Medizin bedeutet dies, dass Strahlung am Menschen nur angewendet werden darf, wenn eine im Strahlenschutz fachkundige Person hierfür die rechtfertigende Indikation gestellt hat. Die rechtfertigende Indikation erfordert die Feststellung, dass der gesundheitliche Nutzen der Strahlenanwendung gegenüber dem Strahlenrisiko überwiegt.

Grundsatz der Optimierung des Strahlenschutzes

Auch die durch eine gerechtfertigte Anwendung bedingte Strahlenexposition ist soweit einzuschränken, wie dies mit den Erfordernissen der medizinischen Wissenschaft zu vereinbaren ist. In der Diagnostik soll die für die diagnostische Fragestellung notwendige Bildqualität mit der geringstmöglichen Dosis erzielt werden.

Grundsatz der Überwachung individueller Dosisgrenzwerte

Die Strahlenexposition für den Einzelnen soll bestimmte Dosisgrenzwerte nicht überschreiten.

Beim Strahlenschutz wird zwischen verschiedenen zu schützenden Personenkreisen unterschieden. Die strengsten Schutzbestimmungen gelten für die allgemeine Bevölkerung. Daneben wird zwischen Patienten und beruflich strahlenexponierten Personen unterschieden. Während die Strahlenexposition für die Patienten nicht durch Grenzwerte, sondern allein über die rechtfertigende Indikation geregelt ist, gibt es für Personen, bei denen auf Grund ihrer beruflichen Tätigkeit eine Strahlenexposition nicht auszuschließen ist, strenge Obergrenzen für eine mögliche Strahlenexposition. Diese Grenzwerte beruhen auf epidemiologischen Untersuchungen, ergänzt durch strahlenbiologische Erkenntnisse. Sie sind so festgesetzt, dass das Risiko stochastischer Strahlenwirkungen in vertretbaren Grenzen verbleibt und dass die Dosis-schwellenwerte für deterministische Strahlenwirkungen nicht überschritten werden (DIN 6814-5 2008, Schröder und Schröder 2007).

Stochastische Strahlenwirkungen sind biologische Strahlenwirkungen, bei denen die Eintrittswahrscheinlichkeit, nicht jedoch der Schweregrad, direkt von der Dosis ab-

hängt, ohne dass ein Schwellenwert existiert. Bei deterministischen Strahlenwirkungen nimmt der Schweregrad der biologischen Wirkung mit steigender Dosis zu. In der Regel kann dabei ein Dosiswellenwert angegeben werden, ab dem die Strahlenwirkung klinisch nachweisbar einsetzt.

1.2.2 Gesetzliche Verankerung des Strahlenschutzes

In Deutschland ist der Strahlenschutz im wesentlichen durch die Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen – Strahlenschutzverordnung StrlSchV - und die Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlung - Röntgenverordnung RöV – geregelt (StrlSchV 2001, RöV 2003). Die Anwendungsgebiete der beiden Verordnungen sind detailliert geregelt. Etwas vereinfacht gesagt, gilt die Röntgenverordnung für die Röntgendiagnostik, während die Strahlenschutzverordnung in der Medizin für Strahlentherapie und Nuklearmedizin gilt.

Das bundesdeutsche Strahlenschutzrecht steht seit seiner Entstehung unter wesentlichem Einfluss europäischer Regelungen. Grund hierfür ist, dass die Bundesrepublik Deutschland sich als Vertragsstaat der Europäischen Atomgemeinschaft EURATOM in den Römischen Verträgen 1957 verpflichtet hat, EURATOM-Richtlinien innerhalb vorgegebener Fristen in nationales Recht umzusetzen. So geht auch die letzte grundlegende Überarbeitung der Strahlenschutz- und der Röntgenverordnung insbesondere auf die Umsetzung der EURATOM-Grundnormen und der EURATOM-Patientenschutzrichtlinie zurück (EURATOM 1996, EURATOM 1997).

Dosisgrenzwerte bei beruflicher Strahlenexposition sind in §31a der RöV festgelegt (siehe Tab. 1). Darüber hinaus wird durch die RöV verbindlich vorgeschrieben, dass für Personen unter 18 Jahren die Effektive Dosis den Grenzwert von 1 mSv im Kalenderjahr nicht überschreiten darf. Bei gebärfähigen Frauen darf die über einen Monat kumulierte Dosis der Gebärmutter den Grenzwert von 2 mSv nicht überschreiten. Für ein ungeborenes Kind, das auf Grund der Beschäftigung der Mutter einer Strahlenexposition ausgesetzt ist, darf die Äquivalentdosis vom Zeitpunkt der Mitteilung der Schwangerschaft bis zu deren Ende den Grenzwert von 1 mSv nicht überschreiten.

Tab. 1 Dosisgrenzwerte bei beruflicher Strahlenexposition (RöV 2003)

Körperdosis, Organdosis	Grenzwerte im Kalenderjahr
Effektive Dosis	20 mSv
Augenlinse	150 mSv
Haut, Hände, Unterarme, Füße und Knöchel	jeweils 500 mSv
Keimdrüsen, Gebärmutter und Knochenmark (rot)	jeweils 50 mSv
Schilddrüse und Knochenoberfläche	jeweils 300 mSv
Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre, andere Organe und Gewebe soweit in dieser Tabelle nicht genannt	jeweils 150 mSv

Desweiteren darf die Berufslebensdosis, also die Summe der in allen Kalenderjahren ermittelten Effektiven Dosen einer beruflich strahlenexponierten Person den Grenzwert von 400 mSv nicht überschreiten.

1.2.3 Messgrößen im Strahlenschutz

Für die Quantifizierung der Strahlenwirkung auf Menschen sowie für Anwendungen von Strahlenschutzmaßnahmen wird zumeist die Effektive Dosis E verwendet. Sie ist definiert als die Summe der Produkte aus Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T , die das genetisch- und krebsbedingte relative Mortalitätsrisiko bei Bestrahlung der Organe T angeben, und den entsprechenden Organ- bzw. Körperdosen H_T :

$$E = \sum w_T \cdot H_T \quad \text{mit } \sum w_T = 1$$

Die Einheit der Effektiven Dosis ist das Sievert (Sv).

Die derzeit gültigen Gewebe-Wichtungsfaktoren sind in Tab. 2 aufgelistet. Diese in Deutschland gesetzlich gültigen Werte gehen auf die ICRP-Empfehlung 60 aus dem Jahre 1990 zurück (ICRP 1991).

Tab. 2 Zahlenwerte des Gewebe-Wichtungsfaktors w_T (RöV 2003)

Organe und Gewebe	Gewebe-Wichtungsfaktor w_T
Keimdrüsen	0,2
Knochenmark (rot)	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
übrige Organe und Gewebe	0,05

Mit den Messmethoden der routinemäßigen Dosimetrie kann eine komplexe Dosisgröße wie die Effektive Dosis nicht erfasst werden. Die einzige Möglichkeit sie zu bestimmen, ist die Berechnung gemäß obiger Formel aus gemessenen oder berechneten Organdosiswerten. Man hat daher messtechnisch leicht zugängliche und die Effek-

tive Dosis in tolerierbarer Näherung repräsentierende Ersatzdosisgrößen eingeführt. Eine dieser Dosisgrößen wird Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$ genannt. Sie ersetzt die früher gebräuchliche Photonen-Äquivalentdosis, die ohne Anwesenheit eines Absorbers frei Luft gemessen wird und daher die in den Organen und Geweben durch Streustrahlung modifizierten Strahlenfelder ignoriert und somit keineswegs einen brauchbaren Wert für die Effektive Dosis liefert. Dagegen ist ein Ortsdosimeter für die Messung von $H^*(10)$ so geeicht, als ob der Messort 10 mm unterhalb der Oberfläche einer gewebeäquivalenten Kugel mit 30 cm Durchmesser liegen würde. Im Vergleich zur Photonen-Äquivalentdosis können sich hierbei um bis zu 30% höhere Messwerte ergeben (Ewen et al. 2003).

Die Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$ an einem interessierenden Punkt im tatsächlichen Strahlungsfeld ist definiert als die Äquivalentdosis, die im zugehörigen ausgerichteten und aufgeweiteten Strahlungsfeld auf dem der Einfallrichtung der Strahlung entgegengesetzten Radius der ICRU-Kugel in 10 mm Tiefe erzeugt würde. Die Einheit der Umgebungsäquivalentdosis ist das Sievert (Sv) (DIN 6814-3 2001).

1.2.4 Strahlenschutzvorkehrungen

Neben dem organisatorischen Strahlenschutz, der durch die Vorgabe von bestimmten Verhaltensweisen und Organisationsformen die Strahlenexposition von Personen zu verhindern bzw. zu vermindern versucht, gibt es gerätetechnischen und baulichen Strahlenschutz. Zum baulichen Strahlenschutz gehören im Wesentlichen ortsfeste Vorrichtungen, durch die Strahlenschutzbereiche abgeschirmt oder abgegrenzt werden, wie z.B. Strahlenschutzwände oder -türen. 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. 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 (SSK 2007). Zum gerätetechnischen Strahlenschutz zählen alle Vorrichtungen, die an der Röntgenanlage angebracht sind. Sie können fest montiert oder

auch abnehmbar sein. Insbesondere zählen hierzu Bleiglasscheiben und andere an der Röntgeneinrichtung angebrachte Abschirmungen und Schutzvorhänge. Über diese Vorkehrungen hinaus gibt es ein umfangreiches Strahlenschutzzubehör, welches vor allem die verschiedenen Formen der Strahlenschutzkleidung umfasst, die für die Abschirmung von außen auf den Körper einfallender Strahlung von großer Bedeutung ist (DIN 6814-5 2008).

1.2.5 Flachdetektor-Angiografieanlagen

Zu Beginn der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts hat die Entwicklung der digitalen Subtraktionsangiografie (DSA) für den Bereich der Angiografie relativ frühzeitig die Weichen in Richtung Digitalisierung gestellt. Das Prinzip der DSA besteht darin, eine vor der Kontrastmittelgabe erzeugte Leeraufnahme von den nach der Kontrastmittelgabe aufgenommenen Bildern zu subtrahieren. Das Differenzbild (Subtraktionsbild) stellt im Idealfall nur noch die kontrastmittelgefüllten Gefäße dar. Heute sind universelle Angiographiesysteme praktisch vollständig digital, wenn man davon absieht, dass in vielen sogenannten digitalen Systemen das analoge Signal einer Bildverstärkerröhre als Ausgangssignal benutzt wird. Dieses Signal muss dann mit Hilfe von Analog-Digital-Wandlern (engl.: *analog to digital converter*, ADC) in die zu einer Bildmatrix angeordneten Bildpunkte (engl.: *picture matrix element*, pixel) umgewandelt werden, wobei jedem Bildpunkt ein bestimmter Grauwert zugeordnet wird. Moderne Anlagen, wie das in der vorliegenden Arbeit untersuchte System, ersetzen den Bildverstärker durch einen digitalen Flachdetektor und bieten damit die direkte digitale Bildinformation.

Bei digitalen Flachdetektoren wird häufig zwischen direkter und indirekter Wandlung der Röntgenstrahlung in elektronische Signale unterschieden (siehe Abb. 1). Bei direkter Wandlung ist die Szintillatorschicht, die sonst die Röntgenstrahlung erst in Licht umwandelt, durch einen Halbleiter (amorphes Selen) ersetzt. Vor der Belichtung wird dieser Halbleiter mit elektrischer Ladung belegt. Beim Auftreffen der Röntgenstrahlung auf den Halbleiter entsteht direkt eine elektrische Leitfähigkeit, die ohne den Umweg über eine Photodiode auf die Auslesematrix aus amorphem Silizium übertragen wird (Strotzer et al. 2002).

Bei indirekter Wandlung nutzt man einen Szintillator (z.B. Cäsiumjodid), um die auftretende Röntgenstrahlung in Licht zu wandeln. Dieses Licht wird dann von einer Photodiode absorbiert und erzeugt dort eine elektrische Ladung, die über die Auslesematrix in ein digitales Bildsignal gewandelt wird (Anschütz 2008).

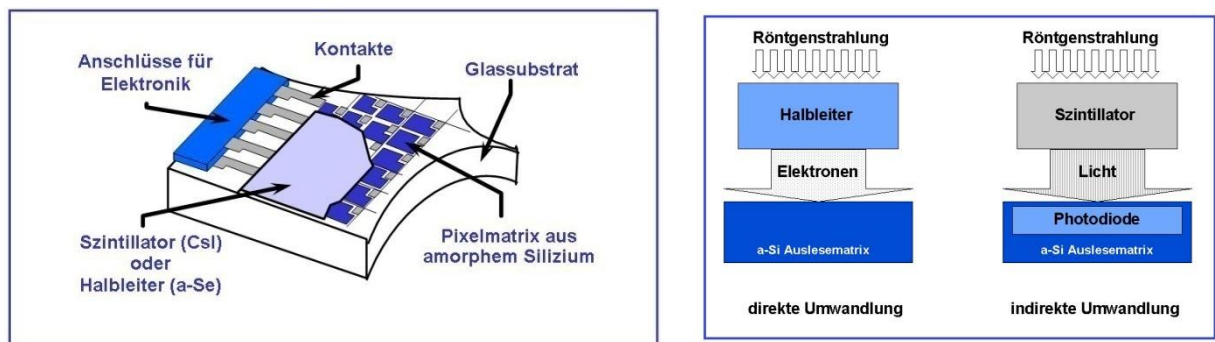


Abb. 1 Aufbau und Funktionsweise eines digitalen Flachdetektors. a) Querschnitt durch einen Detektor b) Direkte und indirekte Umwandlung (Hermann 2003)

Für die fluoroskopische Anwendung wie auch bei dem hier untersuchten System, wird die Szintillator-gestützte Konversion bevorzugt. Die Absorptionseigenschaften des Cäsiumjodids sind für das bei der Fluoroskopie eingesetzte Energiespektrum der Röntgenstrahlung günstiger als die des Selens. Dabei liefert Cäsiumjodid zusätzlich eine höhere detektive Quantenausbeute (engl: *detective quantum efficiency*, DQE) und wirkt durch die Nadelstruktur seiner Kristalle einer durch Streuung verursachten Verringerung der Bildqualität entgegen.

Flachdetektoren liefern deutliche Vorteile gegenüber der konventionellen Radiologie: Anhand von Phantomuntersuchungen und klinischen Studien konnte dargelegt werden, dass die Strahlendosis bei unveränderter Bildqualität gegenüber dem Einsatz von Bildverstärkern um 30-50% reduziert werden kann. Dies ist insbesondere durch die verbesserte Kontrastauflösung digitaler Systeme zu erklären (Strotzer et al. 2002). Zudem werden die typischen Kissenverzerrungen, wie sie bei Bildverstärkern bekannt sind – verursacht durch die schlechte Fokussierung der Elektronen – vermieden. Die durch Streuung entstehenden Schleiereffekte im Glasgehäuse der Bildverstärker werden ebenfalls durch die neue Flachdetektor-Technologie umgangen.

2 Material und Methoden

2.1 Material

2.1.1 Angiografiesystem

Die Untersuchungen im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden an der biplanen Angiografieanlage mit Flachdetektor-Technologie AXIOM Artis dBA (Siemens AG, Erlangen) durchgeführt.



Abb. 2 Angiografiesystem AXIOM Artis dBA in der Abteilung Neuroradiologie der Universitätsmedizin Göttingen

Bei dieser Röntgenanlage handelt sich um ein universelles Angiographiesystem mit zwei C-Bögen. Ein C-Bogen ist am Deckenstativ, der andere an einem Bodenarm montiert. Die C-Bogen-Anordnung erlaubt neben der Standardeinstellung in frontaler und lateraler Projektion seitliche und cranio-caudal angulierte Einstellungen. Damit das interessierende Volumen auch bei schrägen und gekippten Projektionen im Bildmittelpunkt bleibt, erfolgt die Bewegung der C-Bögen um das Isozentrum. Das Isozentrum liegt in beiden Fällen 1060 mm über dem Fußboden, der Abstand Fokus-Isozentrum beträgt jeweils 750 mm. Der bodenmontierte C-Bogen – auch als Ebene A bezeichnet – ist mit einem 30 cm x 38 cm großen Flachdetektor (Pixelgröße 154 μm), der deckenmontierte C-Bogen – auch als Ebene B bezeichnet – mit einem 20 cm x 20 cm großen Flachdetektor (Pixelgröße 184 μm) ausgestattet. Die Detektorbasis ist in beiden Fällen eine Schicht aus amorphem, d.h. nicht kristallinem Silizium (a-Si), der eine Szintillatorschicht aus Cäsiumjodid (CsI) zur Absorption und Umwandlung der einfallenden Röntgenstrahlung vorgeschaltet ist.

Das biplane System ermöglicht eine simultane Abbildung in zwei verschiedenen Projektionsrichtungen bzw. den schnellen Wechsel zwischen zwei Projektionsrichtungen. Die Zeitdauer einer Maßnahme, der Bedarf an Kontrastmittel und die Verweildauer des Katheters im Gefäß lassen sich dadurch signifikant senken.

Die Steuerung der Röntgenstrahlung am AXIOM Artis kann durch den Anwender direkt am Patienten oder auch von einem geschützten Bereich außerhalb des Untersuchungsraumes aus vorgenommen werden. Der Sichtkontakt zum Patienten wird dabei durch eine große Glasscheibe gewährleistet.

2.1.2 Strahlenschutzvorkehrungen

Zu den gerätebezogenen Strahlenschutzvorrichtungen am AXIOM Artis (d)BA zählen ein Unterkörper- und ein Oberkörperstrahlenschutz.

Unterkörperstrahlenschutz

Der teilbare Unterkörperstrahlenschutz (MAVIG GmbH, München) soll zu einer Reduktion der Streustrahlung im unteren Körperbereich des strahlenexponierten Personals führen. Der Strahlenschutz für Anlagen mit einem separaten Patiententisch setzt sich aus fünf Komponenten zusammen. Am Tischfuß befindet sich auf Höhe der Untersucherposition eine fest montierte Halterung mit Metallschiene, zur Anbringung der beweglichen Komponenten. Dazu zählt eine schwenkbare Bleilamellenschiene mit Doppelgelenkadapter, die eine flexible Verbindung zwischen Patiententisch und Adapterschiene zum Aufstecken des Bleigummiaufsatzes bildet. Unterhalb der Adapterschiene hängen bis zum Fußboden des Untersuchungsraumes flexible sich überlappende Bleigummilamellen mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm (DIN EN 61331-3 2002).



Abb. 3 Ober- und Unterkörperstrahlenschutz (MAVIG)

Oberkörperstrahlenschutz

Der Oberkörperstrahlenschutz dient vor allem zum Schutz des Untersuchers vor Streustrahlung im Bereich der Augen und der Schilddrüse. Das Strahlenschutzfenster ist an einer Deckenschiene montiert und somit in allen drei Raumebenen frei beweglich. Es setzt sich aus drei Komponenten zusammen. Der Laufwagen mit Stativ dient der dreidimensionalen Positionierung im Raum. Das Bleiacrylglas mit abgerundeten Ecken und einer hohen Lichttransmission ist an einem Tragarm fixiert. An dieser Scheibe ist zur Optimierung der Handhabung ein Bremsgriff mit Bremsschuh befestigt.

Der Bleigleichwert liegt ebenfalls bei 0,5 mm (DIN EN 61331-3 2002). Bei der Positionierung des Strahlenschutzfensters muss darauf geachtet werden, dass sowohl die Augen als auch die Schilddrüse des Untersuchers geschützt sind. Zudem sollte der „Patienten-Körper-Formausschnitt“ des Bleiacrylglases dem Patienten möglichst nah anliegen, um keine Streustrahlung auf Seite des Behandlers zu erhalten.

2.1.3 Alderson-Rando-Phantom

Da die Ortsdosis im Untersuchungsraum bei einer Röntgenuntersuchung im Wesentlichen nicht aus Primärstrahlung besteht, sondern aus Streustrahlung, die vom exponierten Volumen des Patienten ausgeht, muss für Strahlenschutzuntersuchungen, die ohne Patient durchgeführt werden, ein entsprechendes Phantom als Streukörper eingesetzt werden. Bei den Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurde der Patient durch ein Alderson-Rando-Phantom simuliert.



Abb. 4 Alderson Phantom

RANDO® - Phantome bestehen aus einer wärmefassenden synthetischen Isocyanat-Gummimasse, in welche ein menschliches Skelett eingebettet ist. Das Phantommaterial hat eine Dichte von $0,985 \text{ g/cm}^3$ und eine mittlere Ordnungszahl von 7,3. Damit werden die Streu- und Absorptionseigenschaften des menschlichen Körpers näherungsweise nachgebildet. Das extremitätenlose Phantom entspricht einer Person mit einer Körpergröße von 175 cm und einem Gewicht von 73,5 kg (Shrimpton et al. 1981). Der Phantomkörper besteht aus 35 axial geschnittenen Scheiben mit einer jeweiligen Schichtstärke von 2,5 cm. In jede Platte sind mehrere kleine Löcher eingelassen, welche mit kleinen Thermolumineszenz-Detektoren eine Dosisbestimmung innerhalb des Phantoms ermöglichen. Die einzelnen Scheiben sind zur Stabilisierung miteinander verstiftet.

Zu den vorgeformten Lufträumen, welche aus Abdrücken einer Leiche gewonnen werden, zählen die Abschnitte des Pharynx, des Larynx, der Trachea und der Bronchial-

stämme. Diese werden dann in eine physiologische Lage im postmortalen Skelett gebracht. Die Stirnhöhlen sind durch den Schädelknochen festgelegt und müssen daher nicht künstlich hergestellt werden.

2.1.4 Dosimeter

Sämtliche Dosismessungen in der vorliegenden Arbeit wurden mit dem Universal-Dosismonitor UMo LB 123 Serien Nr. 6908 und der zur Messung der Ortsdosis von Photonenstrahlung geeichten Messsonde LB 1236-H 10 Serien Nr. 6470 (Berthold Technologies GmbH & Co. KG 2000) durchgeführt. Das aus Monitor und Messsonde bestehende Dosimetersystem ist in Abb. 5 wiedergegeben.

Bei diesem Dosimeter handelt es sich um ein Gerät zur Messung der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$. Die eingesetzte Messsonde ist eine Ionisationskammer und besitzt im Energiebereich von 30 keV bis 1,3 MeV einen Messbereich von 0,01 bis 1.678.000 μSv .



Abb. 5 Dosimeter UMo LB 123 (Berthold)

2.2 Methodik

2.2.1 Versuchsaufbau Rotationsangiografie des Kopfes

Bei der Rotationsangiografie werden während einer Aufnahmeserie durch Rotation des C-Bogens die interessierenden Gefäßregionen aus mehreren Projektionsrichtun-

gen aufgenommen. Bei der verwendeten Biplan-Anlage sind Rotationsangiografien nur mit dem Bodenstativ (Ebene A) möglich. Das Deckenstativ wird dabei nicht verwendet und muss sich in der Parkposition befinden. Eine Rotationsangiografie kann ohne oder mit digitaler Bildsubtraktion durchgeführt werden.

Das Alderson-Rando-Phantom wurde für alle Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit in Rückenlage so auf dem Patiententisch gelagert, dass der Kopf des Phantoms in der Kopfmulde der speziellen Neuro-Tischplatte lag. Das Isozentrum befand sich in Kopfmitte. Dadurch wäre bei einer realen Untersuchung sichergestellt, dass diese Region nicht aus dem dargestellten Bildfeld auswandert (Abb. 6). Die Startposition des C-Bogens wurde für alle Untersuchungen mit rechts anterior oblique (RAO) gewählt, d.h. das Bildempfangssystem steht auf der rechten Seite des Patienten. Rotationswinkel und Rotationsgeschwindigkeit wurden durch die Programmauswahl bestimmt.



Abb. 6 Versuchsaufbau Rotationsangiografie

Die für die Strahlenexposition im Untersuchungsraum repräsentativen Messorte wurden in 100 cm, 150 cm, 200 cm und 250 cm Abstand vom Isozentrum in einem Winkel von 30°, 60°, 90° und 120° zur Tischplatte gewählt. Die Bezugs- bzw. Nulllinie verlief dabei in Tischmitte als Längsachse durch den Phantomkörper. Darüber hinaus wurden

die Messorte in der Höhe über dem Fußboden variiert. Ein Messort in 100 cm Höhe war repräsentativ für die Gonadenexposition eines Untersuchers von mittlerer Körpergröße. Während die Schilddrüse durch einen Messort in 150 cm Höhe und die Augen durch einen Messort in 170 cm Höhe repräsentiert wurden (siehe Abb. 7).

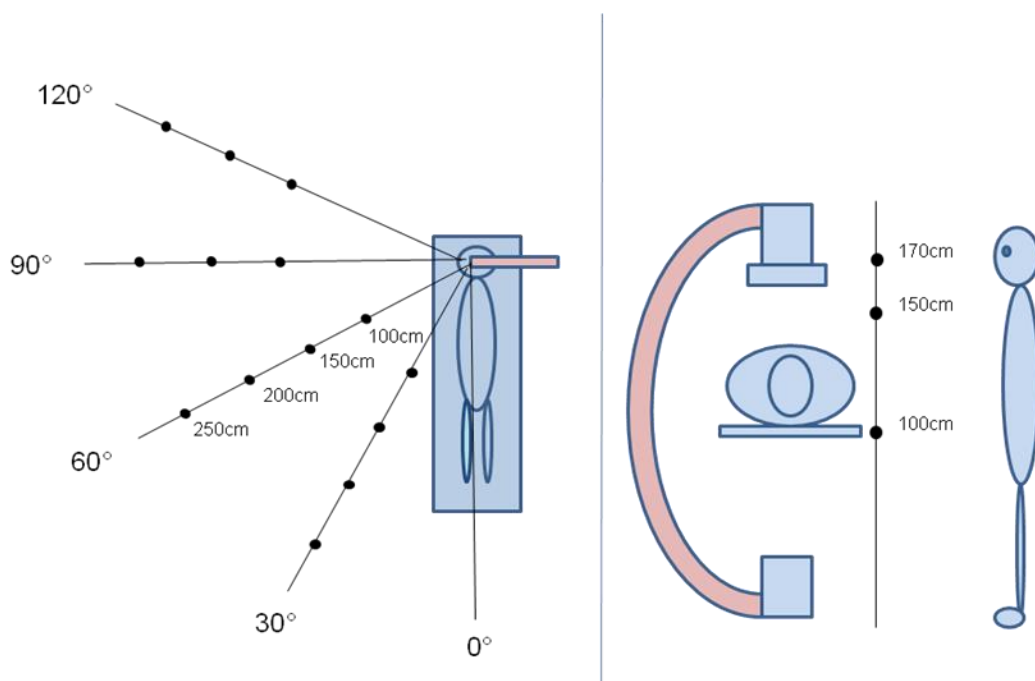


Abb. 7 Messpunkte für die Strahlenexposition im Untersuchungsraum. Links: Ansicht von oben. Rechts: Ansicht von der Seite, Messpunkte in unterschiedlicher Höhe vom Fußboden: Augen (170 cm), Schilddrüse (150 cm) und Gonaden (100 cm).

Die Messungen erfolgten sowohl ohne als auch mit gerätebezogenen Strahlenschutzvorkehrungen. Die Strahlenschutzvorkehrungen bestanden aus Unter- und Oberkörperstrahlenschutz. Zusätzlich wurde mit und ohne aufsteckbaren Bleigummiaufsatz gemessen, da dieser in der Praxis häufig als hinderlich empfunden und abgenommen wird. Die unterschiedlichen Messbedingungen sind in Abbildung 8 skizziert.

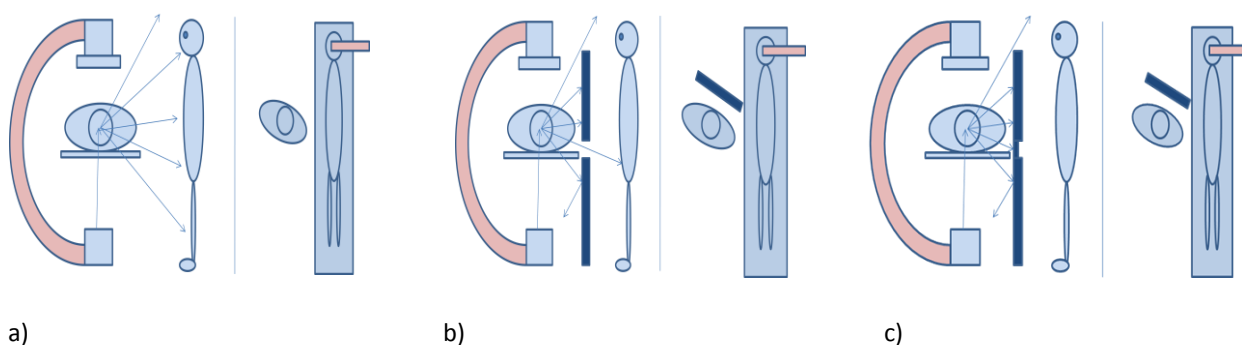


Abb. 8 Die drei Grafiken veranschaulichen den Versuchsaufbau und die Ausbreitung der Streustrahlung a) ohne gerätetechnischen Strahlenschutz b) mit Unter- und Oberkörperstrahlenschutz und c) mit zusätzlichem Bleigummiaufsatz.

Die Strahlenexposition sollte für fünf verschiedene Untersuchungsprogramme beurteilt werden. Die zu den Programmen gehörenden Strahlungsparameter sind in Tab. 3a aufgeführt.

Tab. 3a Für die Rotationsangiografie des Kopfes in dieser Studie eingesetzte Untersuchungsprogramme und die zugehörigen Strahlungsparameter.

Nr.	Kurzbezeichnung	Röhrenspannung in kV	Pulsbreite in ms	Fokusgröße	Dosis pro Bild in $\mu\text{Gy/B}$	Dyna-Zeit in ms	Angulations- schritt in $^\circ/\text{p}$
1	5s DR	70	12,5	klein	0,36	5	1,5
2	8s DR	90	5,0	groß	0,36	8	0,5
3	8s DR H	90	5,0	groß	1,20	8	0,5
4	8s DS	90	5,0	groß	0,36	8	0,5
5	8s DS H	90	5,0	groß	1,20	8	0,5

Bei den Kurzbezeichnungen kennzeichnet R die einfache Rotationsangiografie, S die Subtraktionsangiografie, die sich aus einer Nativaufnahme und einer Aufnahme mit Kontrastmittel zusammensetzt, und H den jeweiligen Hochdosismodus.

2.2.2 Versuchsaufbau DSA des Kopfes

Auch bei den Untersuchungen zur Strahlenexposition im Untersuchungsraum während einer Durchleuchtungsuntersuchung des Kopfes lag das Alderson-Rando-Phantom in Rückenlage auf dem Patiententisch, mit dem Kopf in der Kopfmulde. Für die DSA wurde der Biplan-Modus eingesetzt, d.h. es wurde mit beiden C-Bögen gleichzeitig gearbeitet. Der bodenmontierte C-Bogen, Ebene A, wird dabei links anterior oblique (LAO) positioniert, während das Deckenstativ, Ebene B, senkrecht dazu in eine rechts anterior oblique (RAO) Position gefahren wird (Abb. 9).



Abb. 9 Versuchsaufbau DSA-Serie

Die Messorte für die Strahlenexposition im Untersuchungsraum waren identisch mit denjenigen bei der Rotationsangiographie. Der parallele Einsatz beider C-Bögen war nur im Pulsbetrieb möglich. Die Messungen wurden bei Bildfrequenzen von 0,5 B/s, 3 B/s und 15 B/s jeweils mit und ohne gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtungen durchgeführt. Die gesamte Aufnahmezeit betrug in jedem Fall 6 s (Tabelle 3b).

Tab. 3b Für die DSA-Serie des Kopfes eingesetzte Untersuchungsprogramme. Die gesamte Aufnahmezeit betrug in jedem Fall 6 s.

Nr.	Untersuchungsprogramm	Dauer	Anzahl der Bilder
1	Carotis 0,5 B/s	6 s	3
2	Carotis 3 B/s	6 s	18
3	Carotis 15 B/s	6 s	90

2.2.3. Grafikprogramm und statistische Auswertung

Zur Auswertung und grafischen Darstellung der ermittelten Dosiswerte wurde ausschließlich auf das Programm Excel 2007 (Microsoft®) zurückgegriffen.

3 Ergebnisse

3.1 Rotationsangiografie des Kopfes

3.1.1 Ermittlung von Dosis-Transferfaktoren

Das Axiom Artis (d)BA bietet dem behandelnden Arzt die Möglichkeit, zwischen unterschiedlichen Protokollen zu wählen. Je nach Indikation führt der Interventionist eine Rotationsangiografie oder eine DSA durch. Dabei ist eine Variation der Durchleuchtungszeit (5s und 8s) sowie die Wahl zwischen Hoch- und Niedrigdosisprotokollen möglich. Zunächst sollte ermittelt werden, in welchem Verhältnis an einem gegebenen Messort die für die unterschiedlichen Protokolle resultierenden Dosiswerte stehen und ob daraus entsprechende Dosis-Transferfaktoren bestimmt werden können, mit deren Hilfe die Dosiswerte für die verschiedenen Protokolle ineinander überführt werden können.

Tab. 4 Messwerte für die Ortsdosis in μSv in einem Winkel von 30° zur Tischplatte und einer Höhe über dem Fußboden von 150 cm (repräsentativ für die Schilddrüse eines Untersuchers an diesem Standort) für 5 unterschiedliche Protokolle des Axiom Artis (d)BA in vier verschiedenen Entfernungen vom Isozentrum. Die Messwerte sind für den Aufbau a) ohne Strahlenschutzvorrichtung und b) mit vollständiger gerätetechnischer Strahlenschutzvorrichtung aufgeführt.

Protokollvergleich bei einem Winkel von 30° . Messhöhe (150 cm) Schilddrüse					
	8s DS H	8s DR H	8s DS	8s DR	5s DR
a) ohne Strahlenschutzvorrichtung					
100 cm	120,40	62,25	60,82	32,73	19,56
150 cm	79,46	40,43	38,36	18,87	10,76
200 cm	53,92	27,44	23,74	11,63	6,67
250 cm	37,37	19,07	16,66	7,73	4,36
b) mit vollständiger gerätetechnischer Strahlenschutzvorrichtung					
100 cm	7,84	4,37	3,22	1,62	0,63
150 cm	7,09	3,73	2,77	1,39	0,60
200 cm	5,68	3,00	2,23	1,12	0,50
250 cm	4,92	2,24	1,68	0,84	0,38

Mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse wurde untersucht, ob die Messwerte aus Tab. 4 an den vier Messorten für die verschiedenen Protokolle in einem festen Verhältnis stehen. Die als Steigung der jeweiligen Regressionsgerade ermittelten Regressionskoeffizienten, die Korrelationskoeffizienten R und die daraus abgeleiteten Umrechnungsfaktoren sind in Tabelle 5 wiedergegeben. Der Korrelationskoeffizient gibt an, in welchem Maße tatsächlich ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden untersuchten Messwerten besteht. Korrelationen werden als stark bezeichnet, wenn dieser Faktor $> 0,8$ ist.

Tab. 5 Durch lineare Regressionsanalyse ermittelte Umrechnungsfaktoren, die unabhängig vom Messort bei gleicher Strahlenschutzsituation die Messwerte für das Protokoll 8s DS H in die Messwerte anderer Protokolle überführen. Ebenfalls angegeben ist der jeweilige Korrelationskoeffizient R.

Protokoll, in das umgerechnet werden soll	Regressionskoeffizient \pm Standardabweichung	Korrelationskoeffizient R	Dosis-Transferfaktor (ausgehend von Protokoll 8s DS H)
8s DR H	0,514 \pm 0,003	0,99992	0,50
8s DS	0,501 \pm 0,010	0,99858	0,50
8s DR	0,263 \pm 0,011	0,99447	0,25
5s DR	0,157 \pm 0,007	0,99226	0,16

Es zeigten sich hinreichend reproduzierbare Zusammenhänge, so dass die folgenden Messungen nur mit dem Hochdosisprotokoll 8s DS H durchgeführt wurden und bei Überlegungen zu den anderen Protokollen die in Tabelle 5 rechte Spalte wiedergegeben Umrechnungsfaktoren eingesetzt werden konnten.

3.1.2 Messergebnisse für die Ortsdosis an definierten Raumpunkten

Während einer simulierten Rotationsangiografie des Kopfes mit dem Untersuchungsprotokoll 8s DS H wurde an den in Absatz 2.2.1. definierten Raumpunkten die Ortsdosis bestimmt. Dabei wurde in drei repräsentativen Höhen über dem Fußboden 100 cm für die Gonaden, 150 cm für die Schilddrüse und 170 cm für die Augen gemessen. Des Weiteren wurde bei den Messungen zwischen drei unterschiedlichen Einsatzsituationen der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtungen unterschieden. Zunächst wurde mit vollständigem Strahlenschutz aus Oberkörper- und Unterkörperstrahlenschutz einschließlich des Bleigummiaufsatzes gemessen, anschließend wurde bei den Messungen durch den Abbau des Bleigummiaufsatzes ein Spalt zwischen Oberkörper- und Unterkörperstrahlenschutz gelassen. Schließlich wurden auch Messungen ohne Strahlenschutzvorrichtung durchgeführt.

Alle Messergebnisse sind in den Tabellen 6 und 7 wiedergegeben. Die geplanten Messungen in 100 cm bzw. 250 cm Entfernung vom Zentralstrahl auf den Winkelachsen von 90° und 120° konnten nicht durchgeführt werden, da der C-Bogen bei 100 cm einen Rotationsverlauf hat und in 250 cm Abstand die räumlichen Gegebenheiten im Untersuchungsraum keine Messung ermöglichten.

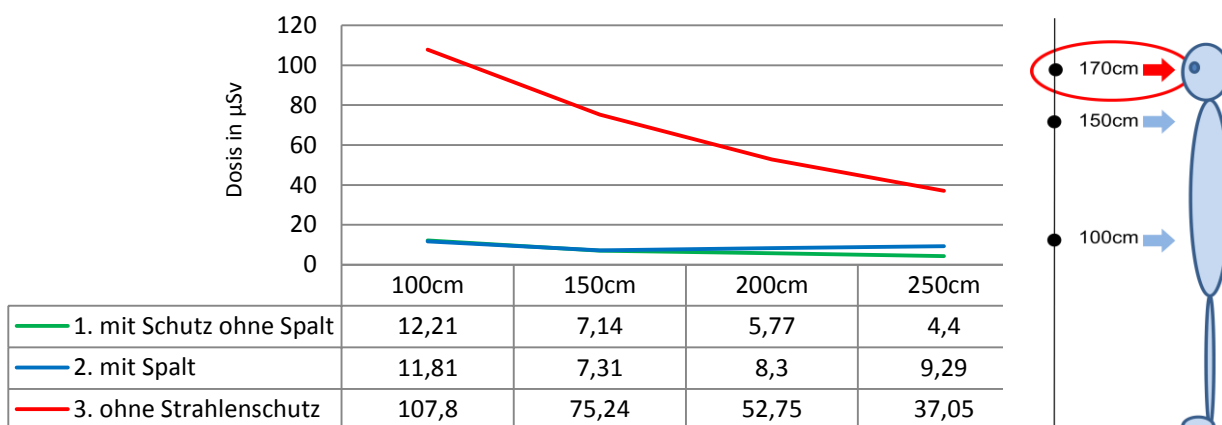
In Abb. 10 sind die Messergebnisse auf der 30°-Achse für die einzelnen Strahlenschutzsituationen graphisch dargestellt.

Tab. 6 Winkelabhängigkeit: Messergebnisse für die Ortsdosis in μSv an drei repräsentativen Höhen über dem Fußboden. Jeweils in den Abständen 100 cm, 150 cm, 200 cm und 250 cm vom Isozentrum in einem Winkel von 30° , 60° , 90° und 120° von der Tischachse. Die Ortsdosis wurde ohne Strahlenschutzvorrichtung mit dem Protokoll 8s DS H für jeweils eine Rotation des Strahlerkopfes gemessen.

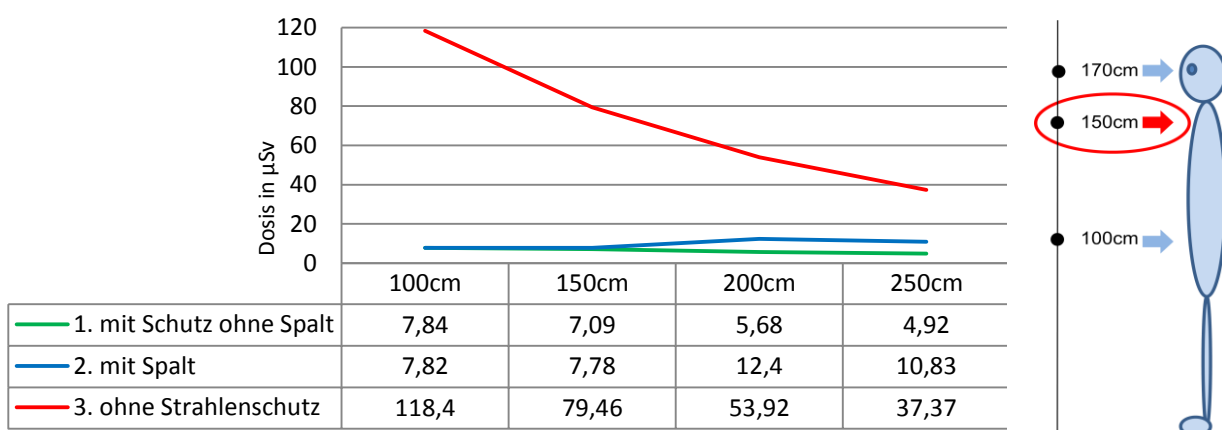
	Entfernung zum Isozentrum			
	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm
a) Winkel 30°				
Auge	107,80	75,24	52,75	37,05
Schilddrüse	118,40	79,46	53,92	37,37
Gonaden	112,80	75,62	50,55	35,11
b) Winkel 60°				
Auge	154,10	91,64	68,60	51,32
Schilddrüse	128,50	97,05	70,39	51,35
Gonaden	129,80	93,81	66,30	47,45
c) Winkel 90°				
Auge	-	82,03	61,95	-
Schilddrüse	-	85,16	62,96	-
Gonaden	-	81,21	55,21	-
d) Winkel 120°				
Auge	-	78,88	59,63	-
Schilddrüse	-	81,55	59,64	-
Gonaden	-	81,21	57,13	-

Tab. 7 Einfluss der Strahlenschutzvorrichtung: Messergebnisse für die Ortsdosis in μSv an drei repräsentativen Höhen über dem Fußboden. Jeweils in den Abständen 100 cm, 150 cm, 200 cm und 250 cm vom Isozentrum in einem Winkel von 30° von der Tischachse. Die Ortsdosis wurde mit dem Protokoll 8s DS H mit vollständigem Strahlenschutz, ohne Bleigummiaufsatz und vollständig ohne gerätetechnischer Strahlenschutzvorrichtung für jeweils eine Rotation des Strahlerkopfes gemessen.

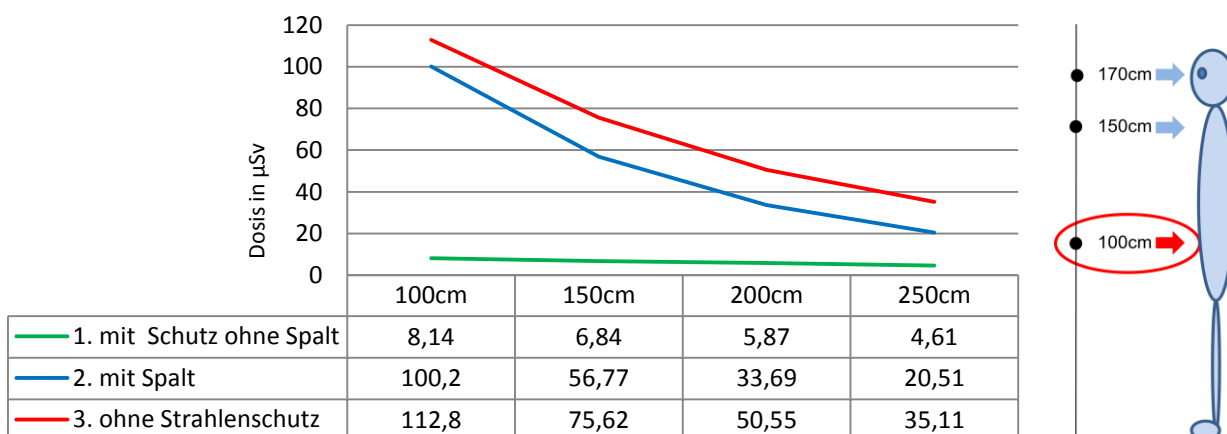
	Entfernung zum Isozentrum			
	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm
<u>a) vollständige Strahlenschutzvorrichtung</u>				
Auge	12,21	7,14	5,77	4,40
Schilddrüse	7,84	7,09	5,68	4,92
Gonaden	8,14	6,84	5,87	4,61
<u>b) ohne Bleigummiaufsatz</u>				
Auge	11,81	7,31	8,30	9,29
Schilddrüse	7,82	7,78	12,4	10,83
Gonaden	100,20	56,77	33,69	20,51
<u>c) ohne gerätetechnischen Strahlenschutz</u>				
Auge	107,80	75,24	52,75	37,05
Schilddrüse	118,40	79,46	53,92	37,37
Gonaden	112,80	75,62	50,55	35,11



a) Protokoll 8s DS H (für den Winkel 30° zur Tischmitte, Höhe der Augen: 170 cm)



b) Protokoll 8s DS H (für den Winkel 30° zur Tischmitte, Höhe der Schilddrüse: 150 cm)



c) Protokoll 8s DS H (für den Winkel 30° zur Tischmitte, Höhe der Gonaden: 100 cm)

Abb. 10 Grafik a)- c), Dosiswerte in μSv für das Protokoll 8s DS H mit einem Winkel von 30° zur Tischmitte mit unterschiedlichem Einsatz der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtungen. Kompletter Einsatz von Ober- und Unterkörperstrahlenschutz einschließlich Bleigummiaufsatz (grüne Linie), ohne Bleigummiaufsatz (blaue Linie), vollständig ohne Strahlenschutz (rote Linie).

3.2 DSA des Kopfes

3.2.1 Messergebnisse für die Ortsdosis an definierten Raumpunkten

Bei den Untersuchungen zur Strahlenexposition im Untersuchungsraum während einer DSA-Serie des Kopfes lag das Alderson-Rando-Phantom wieder in Rückenlage auf dem Patiententisch, mit dem Kopf in der Kopfmulde. Die Messorte für die Strahlenexposition im Untersuchungsraum waren identisch mit denjenigen bei der Rotationsangiografie. Die Messungen wurden bei Bildfrequenzen von 0,5 B/s, 3 B/s und 15 B/s jeweils mit und ohne gerätetechnische Strahlenschutzvorrichtung durchgeführt. Die Aufnahmezeit betrug in allen Fällen 6 s (Tabelle 8).

a) Winkel 30°, mit vollständigem Strahlenschutz				Winkel 30°, ohne Bleigummaufsatz				Winkel 30°, ohne geräte technische Strahlenschutzvorrichtung			
Entfernung: 100 cm		Entfernung: 150 cm		Entfernung: 100 cm		Entfernung: 150 cm		Entfernung: 100 cm		Entfernung: 150 cm	
Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	
0,22	1,05	2,77	0,23	1,06	2,80	0,17	0,80	2,11	0,23	1,06	2,77
0,17	0,80	2,11	0,19	0,86	2,27	0,16	0,77	2,03	0,23	1,07	2,82
0,17	0,80	2,11	7,17	33,25	58,18	0,16	0,74	1,95	3,00	13,9	36,70
Entfernung: 200 cm											
0,16	0,81	2,14	0,17	0,80	2,11	0,14	0,71	1,87	0,47	2,2	5,81
0,16	0,74	1,95	0,18	0,81	2,14	0,14	0,66	1,74	1,00	4,62	12,20
0,14	0,71	1,87	0,14	0,61	1,61	0,14	0,61	1,61	1,55	7,20	19,00
Entfernung: 250cm											
0,17	0,80	2,11	0,17	0,80	2,11	0,17	0,80	2,11	0,70	3,26	8,61
0,18	0,80	2,11	0,18	0,80	2,11	0,18	0,80	2,11	0,71	3,32	8,76
0,10	0,45	1,19	0,10	0,45	1,19	0,10	0,45	1,19	0,73	3,39	8,95

b) Winkel 60°, mit vollständigem Strahlenschutz				Winkel 60°, ohne Bleigummaufsatz				Winkel 60°, ohne geräte technische Strahlenschutzvorrichtung			
Entfernung: 100 cm		Entfernung: 150 cm		Entfernung: 100 cm		Entfernung: 150 cm		Entfernung: 100 cm		Entfernung: 150 cm	
Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s	Carotis 0,5 B/s	Carotis 3 B/s	Carotis 15 B/s
4,74	22,25	52,23	4,78	22,16	58,50	4,78	22,16	58,50	4,82	22,89	53,35
6,48	30,44	64,74	5,44	25,23	66,60	5,44	25,23	66,60	6,85	32,37	66,05
7,23	35,18	62,99	7,64	35,46	62,00	7,64	35,46	62,00	7,27	34,82	61,11
Entfernung: 150 cm											
3,00	13,64	36,62	3,48	16,16	42,66	3,48	16,16	42,66	3,51	15,89	40,54
3,21	14,60	36,77	3,14	14,55	38,41	3,14	14,55	38,41	3,73	17,38	44,04
3,42	16,02	39,13	3,41	15,84	41,82	3,41	15,84	41,82	3,55	16,38	40,47
Entfernung: 200 cm											
1,81	8,63	24,24	1,86	8,64	22,81	1,86	8,64	22,81	2,19	10,06	29,27
1,81	8,48	23,72	1,83	8,50	22,44	1,83	8,50	22,44	2,21	10,34	29,00
1,88	8,80	24,56	1,94	8,99	23,73	1,94	8,99	23,73	1,95	9,28	25,99
Entfernung: 250cm											
1,18	5,38	16,62	1,18	5,47	14,44	1,18	5,47	14,44	1,45	6,70	20,48
1,17	5,31	16,31	1,14	5,31	14,02	1,14	5,31	14,02	1,46	6,71	20,56
1,13	5,30	16,27	1,15	5,33	14,07	1,15	5,33	14,07	1,24	5,62	17,46

Tab. 8 Messergebnisse für die Ortsdosis in μSv während einer DSA des Kopfes an drei repräsentativen Höhen über dem Fußboden. Jeweils in den Abständen 100 cm, 150 cm, 200 cm und 250 cm vom Isozentrum in einem Winkel von 30° und 60° von der Tischachse. Die Ortsdosis wurde mit den Bildfrequenzen 0,5 B/s, 3 B/s und 15 B/s mit vollständigem Strahlenschutz, ohne Bleigummaufsatz und vollständig ohne geräte technische Strahlenschutzvorrichtung für jeweils eine Rotation des Strahlertkopfes für 6 s gemessen.

4 Interpretation und Analyse der Ergebnisse

4.1 Ortsdosis bei der Rotationsangiografie

Zunächst wurde die Ortsdosis an definierten Raumpunkten im Angiografie-Raum während einer simulierten Rotationsangiografie des Kopfes bestimmt. Bei den in Tabelle 6 wiedergegebenen Messwerten für jeweils vier verschiedene Abstände vom Isozentrum in unterschiedlichen Winkeln zur Längsachse des Tisches fällt auf, dass die Werte zwar von Winkel und Entfernung abhängen, dass jedoch die Höhe des Messortes über dem Fußboden nur geringen Einfluss auf die Messgröße hat. Für die drei repräsentativ ausgewählten Organe, Auge, Schilddrüse und Gonaden wurden bei gleichem Abstand vom Isozentrum und gleichem Winkel zur Tischachse annähernd gleiche Dosiswerte gemessen. Da diese Messungen ohne Strahlenschutzvorrichtungen durchgeführt wurden, konnte sich das Strahlenfeld entsprechend aufweiten, so dass im Rahmen der hier vorhandenen Messgenauigkeit trotz unterschiedlicher Messhöhe keine signifikant voneinander abweichenden Dosiswerte ermittelt wurden.

Mit zunehmendem Abstand vom Isozentrum ist jedoch, wie zu erwarten war, ein deutlicher Dosisabfall zu beobachten (Abb. 11). Sowohl auf der 30° als auch auf der 60°-Achse zeigt sich, dass eine Vergrößerung des Abstandes vom Isozentrum um 50 cm, von z.B. 100 cm auf 150 cm, mit einer Dosisreduzierung von 30% einhergeht. Die graphische Auftragung der relativen Dosis in Abhängigkeit von der Entfernung zum Isozentrum zeigt, dass das Abstandquadratgesetz in seiner theoretischen Form nicht erfüllt ist. Nach diesem Gesetz nimmt die Dosisleistung an einem Punkt mit dem Quadrat der Entfernung zur Strahlenquelle ab, d.h. bei doppelter Entfernung reduziert sich die Dosisleistung auf ein Viertel des Ausgangswertes. Im vorliegenden Fall reduziert sich die Dosis bei einer Verdopplung des Abstandes von 100 cm auf 200 cm jedoch nur auf ca. 50%. Diese Abweichung ist nicht überraschend, da das Abstandquadratgesetz exakt nur für Punktquellen im Vakuum gilt. Dennoch zeigt sich eindrucksvoll die Bedeutung des Abstands von der Strahlenquelle für den Strahlenschutz der Beschäftigten.

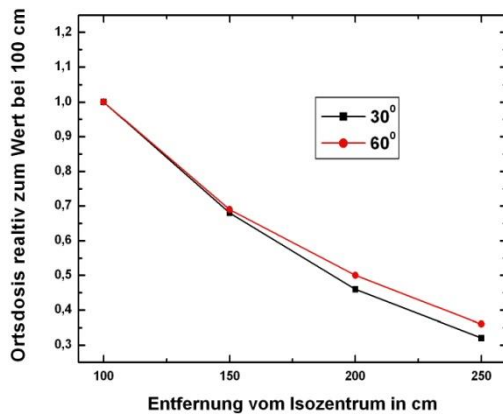


Abb. 11 Relativwerte der Ortsdosis in Abhängigkeit von der Entfernung zum Isozentrum. Die Dosiswerte für einen 30°- und 60°-Winkel relativ zur Tischachse sind bezogen auf den Messwert in 100 cm Abstand. Die Werte wurden ohne Strahlenschutzvorrichtung gemessen und anschließend für jeden Abstand über die drei unterschiedlichen Höhen über dem Fußboden gemittelt.

Aus den Werten der Tabelle 6 ist auch zu sehen, dass die höchsten Dosiswerte für alle Abstände in einem Winkel von 60° gemessen wurden (Abb. 12). Die Dosis auf der 60°-Achse liegt um etwa 30% über den bei 30° gemessenen Werten.

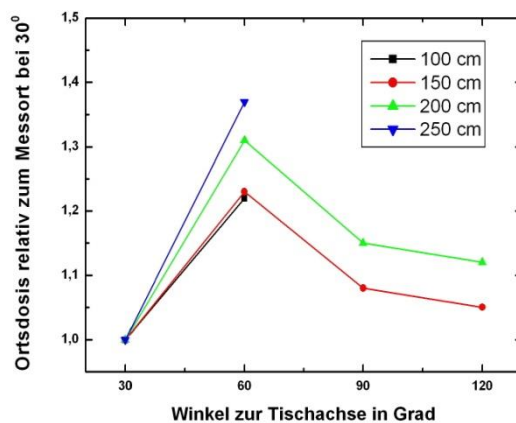


Abb. 12 Relativwerte der Ortsdosis in Abhängigkeit vom Winkel zur Längsachse des Tisches. Die Dosiswerte für die vier Abstände sind normiert auf den jeweiligen Messwert bei 30°. Die Werte wurden ohne Strahlenschutzvorrichtung gemessen und anschließend für jeden Abstand über die drei unterschiedlichen Höhen über dem Fußboden gemittelt.

Die Dosisreduzierung, die mit der dreiteiligen Strahlenschutzvorrichtung aus Unterkörper- und Oberkörperstrahlenschutz gemäß Absatz 2.1.2 zu erreichen ist, kann aus Tabelle 7 abgeleitet werden. Beim vollständigen Einsatz der Strahlenschutzvorrichtung ergaben sich für die drei repräsentativen Organe, d.h. die drei unterschiedlichen Messhöhen über dem Fußboden, im Rahmen der Messgenauigkeit keine abweichenden Werte. Die Dosisreduktion gegenüber der Messung ohne Strahlenschutzvorrichtung betrug für alle vier untersuchten Abstände vom Isozentrum ca. 90%. Die Situation änderte sich jedoch grundlegend, wenn der Bleigummiaufsatz entfernt wurde und so ein Spalt zwischen Oberkörper- und Unterkörperstrahlenschutz gelassen wurde. In diesem Fall wurde in Höhe der Gonaden nur ca. 10% Schutzwirkung erzielt, d.h. noch 90% der ohne Strahlenschutzvorrichtung gemessenen Dosis waren in 100 cm Entfernung vom Isozentrum in 100 cm Höhe über dem Fußboden nachzuweisen. Mit zunehmendem Abstand verringerte sich dieser relative Dosisanteil jedoch weiter. Siehe hierzu auch die graphische Darstellung in Abb. 11. Für die Messpunkte auf Augen- und Schilddrüsenhöhe hatte die Abnahme des Bleigummiaufsatzes bei einem Abstand von 100 cm und 150 cm zunächst keinen signifikanten Einfluss, bei größeren Abständen stieg der relative Ortsdosisanteil jedoch von 10% auf etwa 30% der Dosis ohne Strahlenschutzvorrichtung. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Strahlung zunächst durch den Schlitz kollimiert wird, sich dann aber mit zunehmendem Abstand aufweitet und auch die höher liegenden Organe trifft.

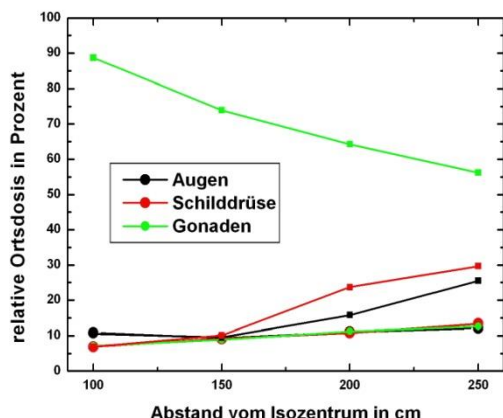


Abb. 13 Relativwerte der Ortsdosis in Abhängigkeit vom Abstand zum Isozentrum. Die durch Quadrate wiedergegeben Messpunkte wurde ohne Bleigummiaufsatz ermittelt, dagegen stehen die ausgefüllten Kreise für Messungen mit vollständigem Strahlenschutz. Die Farben Schwarz, Rot und Grün stehen für die drei Messhöhen bzw. repräsentativen Organe Auge, Schilddrüse und Gonaden. Alle Dosiswerte wurden auf die entsprechenden Messwerte ohne Strahlenschutzvorrichtung bezogen.

4.2 Ortsdosis bei der DSA

Die Dosiswerte für die DSA wurden mit drei unterschiedlichen Bildfrequenzen jeweils über 6 Sekunden gemessen. Wenn die an einem bestimmten Ort resultierende Dosis allein durch die Anzahl der Aufnahmen bestimmt wäre, müssten die Dosiswerte für die verschiedenen Bildfrequenzen im Verhältnis 3 : 18 : 90 stehen. Tabelle 8 zeigt aber deutlich, dass dies nicht der Fall war. Zu einer genaueren Datenanalyse wurde auch hier die graphische Darstellung gewählt. In Abb. 14 sind die Dosiswerte für 3 B/s und 15 B/s in Abhängigkeit von den Werten für 0,3 B/s am gleichen Messort unter gleichen Messbedingungen aufgetragen. Es erfolgte eine Regressionsanalyse. Für das Verhältnis (Dosis bei 3 B/s) / (Dosis für 0,5 B/s) ergab sich ein Faktor $4,68 \pm 0,38$ bei einem Korrelationskoeffizienten $R = 0,9993$. Der Quotient (Dosis bei 15 B/s) / (Dosis bei 0,5 B/s) betrug $11,5 \pm 1,7$ bei einem Korrelationskoeffizienten $R = 0,9944$. Bei Dosiswerten für eine Bildfrequenz von 15 B/s wichen alle Dosiswerte bei etwa $60 \mu\text{Sv}$ signifikant von der Regressionsgeraden ab. Eine Einzelwertanalyse zeigte, dass dies die Dosiswerte für die repräsentativen Messorte von Schilddrüse und Gonaden in 100 cm Abstand vom Isozentrum waren. Retrospektiv war diese Abweichung nicht zu erklären. Da diese abweichenden Werte für beide Winkel jeweils in den drei unterschiedlichen

Strahlenschutzsituationen ermittelt wurden, ist eine fehlerhafte Positionierung des Dosimeters unwahrscheinlich. Es liegt vielmehr die Vermutung nahe, dass die zeitliche Auflösung des Dosimeters nicht ausgereicht hat, die Dosis vollständig zu erfassen und eine Art Sättigungseffekt vorliegt. Die Werte dieser Messorte wurden daher für die weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt. Die oben angegebene Beziehung wurde bereits ohne die Messpunkte ermittelt.

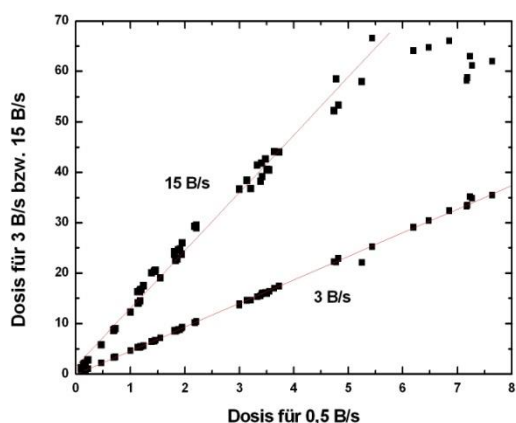


Abb. 14 Gemessene Ortsdosis für die Bildfrequenzen 15 B/s und 3 B/s in Abhängigkeit von der Dosis bei 0,5 B/s. Die Untersuchungszeit betrug in jedem Fall 6 s. Werte größer 58 μSv wurden für die Regressionsanalyse nicht berücksichtigt; Einzelheiten hierzu im Text.

Des Weiteren ist aus den Daten der Tabelle 8 zu entnehmen, dass auch bei der DSA für einen gleichen Abstand vom Isozentrum die Dosis auf der 60°-Achse im Rahmen der Messgenauigkeit stets größer war als auf der 30°-Achse.

Die Dosisabnahme mit zunehmendem Abstand vom Isozentrum und die Auswirkungen der unterschiedlichen Strahlenschutzsituationen sind exemplarisch für eine Bildfrequenz von 3 B/s in den Abbildungen 15 a) und b) wiedergegeben.

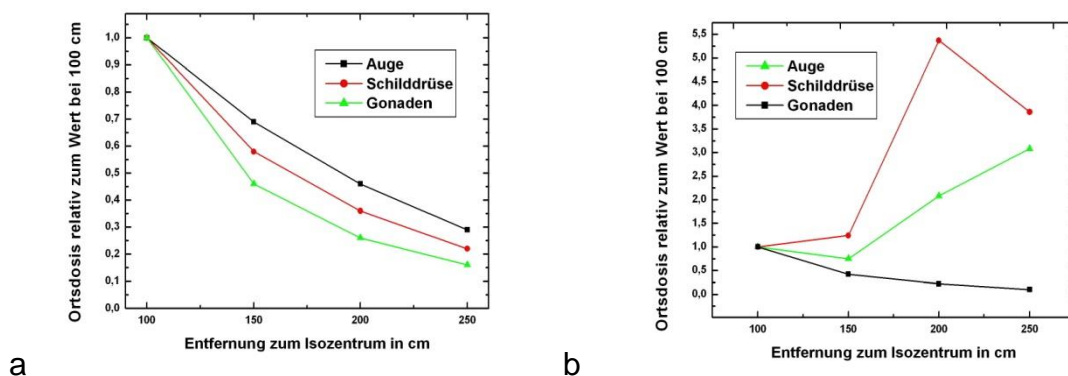


Abb. 15 Relativwerte der Ortsdosis in Abhängigkeit vom Abstand zum Isozentrum; alle Messungen wurden auf der 30°-Achse mit einer Bildfrequenz von 3 B/s durchgeführt. a) Messungen ohne Strahlenschutzvorkehrungen. b) Messungen mit Oberkörper- und Unterkörperstrahlenschutz jedoch ohne Bleigummiaufsatz.

Während bei den Messungen ohne Strahlenschutzvorkehrungen die Dosis mit zunehmendem Abstand vom Isozentrum kontinuierlich abnahm, zeigte sich beim Einsatz der Oberkörper- und Unterkörperstrahlenschutzvorrichtung ohne Bleigummiaufsatz für die Dosis in Augen- und Schilddrüsenhöhe mit zunehmendem Abstand eine Dosiserhöhung. Dieser Effekt war bereits bei der Rotationsangiografie beobachtet worden. Zunächst wird die sich ausbreitende Strahlung durch den freigelassenen Schlitz kollimiert, um sich dann aber mit zunehmendem Abstand aufzuweiten und auch dann die höher liegenden Organe trifft.

Der Unterschied zwischen dem Einsatz des vollständigen Strahlenschutzes und dem Nichteinsatz des Bleigummiaufsatzes wird in Abb. 15b verdeutlicht. Während beim vollständigen Strahlenschutz die ursprünglich vorhandene Dosis für alle Abstände auf etwa 5% reduziert wird, bietet der unvollständige Einsatz des Strahlenschutzes für die Gonaden in 100 cm Entfernung vom Isozentrum keinerlei Schutz gegenüber dem vollständigen Verzicht auf Strahlenschutzvorrichtungen. Für Augen und Schilddrüse nimmt die relative Schutzwirkung mit zunehmendem Abstand bis auf 50% ab.

4.3 Vergleich von Rotationsangiografie und DSA

Die Entscheidung, ob eine Rotationsangiografie oder eine DSA anzufertigen ist, wird aufgrund der medizinischen Fragestellung und der rechtfertigenden Indikationsstellung durch den fachkundigen Arzt getroffen. Beide Untersuchungen sind nicht gleichwertig und können nicht beliebig gegeneinander getauscht werden. So gehört z.B. beim Coiling eines Aneurysmas eine dreidimensionale Darstellung der Blutgefäße zum klinischen Standard und macht den Einsatz der Rotationsangiografie unumgänglich.

Das Verhältnis der Strahlenexposition des Untersuchers bei einer DSA-Serie zur Strahlenexposition bei einer Rotationsangiografie ist für die drei untersuchten Organe mit unterschiedlichem Einsatz des gerätebezogenen Strahlenschutzes dargestellt. Hierfür wurde mathematisch der Quotient aus der Dosis DSA-Serie und Dosis der Rotationsangiografie gebildet. Ein Verhältnis von 0,2 bedeutet, dass die Strahlenexposition durch eine DSA nur 20% der Strahlenexposition bei einer Rotationsangiografie ausmacht. Wenn mit vollständigem Strahlenschutz das Verhältnis 0,1 erreicht wird, ist die Strahlenexposition durch eine Rotationsangiografie immer noch etwa 10-mal so groß wie bei einer DSA (Abb.16).

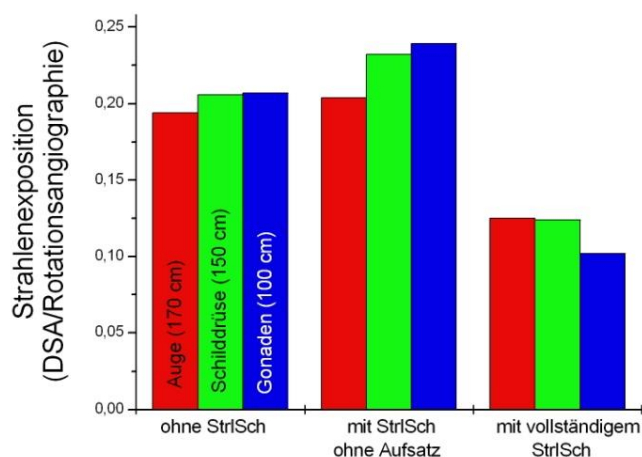


Abb. 16 Verhältnis der Strahlenexposition des Untersuchers bei einer DSA-Serie zur Strahlenexposition bei einer Rotationsangiografie für die drei untersuchten Organe mit unterschiedlichem Einsatz des gerätebezogenen Strahlenschutzes

Will man dennoch die resultierende Ortsdosis im Untersuchungsraum vergleichen, muss beachtet werden, dass in der klinischen Routine keine singuläre DSA-Serie angefertigt wird, sondern durchschnittlich 8 Serien gefahren werden. Mit den Tab. 7 und 8 aufgelisteten Messwerten ergibt sich für das Verhältnis der Ortsdosis aus einer Rotationsangiografie (Protokoll 8 s DS H) und der resultierenden Ortsdosis für eine aus 8 Serien bestehende DSA in Standardprojektion (6s, 3 B/s) ein Wert von 0,63. Das bedeutet, dass ohne den Einsatz von gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtungen an gleichen Messorten auf der 30°-Achse die Ortsdosis bei einer DSA aus 8 Serien um fast 40% größer ist als bei einer Rotationsangiografie.

Auch wenn bei der Rotationsangiografie der C-Bogen im Gegensatz zur DSA in Bewegung ist, stellt sich Wirksamkeit der einzelnen Elemente der dreiteiligen Strahlenschutzvorrichtung nahezu identisch dar. Von besonderer Bedeutung ist in beiden Fällen der Einsatz des Bleigummiaufsatzes, da sonst eine Lücke zwischen Oberkörper- und Unterkörperschutz entsteht, durch die insbesondere die Gonaden einer vollständig vermeidbaren Exposition ausgesetzt werden.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

5.1 Überschreitung der gesetzlichen Dosisgrenzwerte

Die DSA kommt in unterschiedlichen Bereichen der Neuro- und Kardioradiologie zum Einsatz. Dazu zählen unter anderem die diagnostische Angiografie, die Befundbehandlung und die interventionelle Angiografie.

Die diagnostische Angiografie setzt sich ausschließlich aus mehreren DSA zusammen. Bei einer Befundbehandlung und bei der interventionellen Angiografie erfolgt eine Kombination aus DSA-Serien und Rotationsangiografie. Unter Verwendung von Erfahrungswerten aus der Abteilung erfolgt in diesem Abschnitt eine Beispielrechnung für die jeweilige Untersuchungsform, die dann aus den in der Arbeit vorliegenden Messungen für jede Behandlung spezifisch hergeleitet werden kann.

Die in den folgenden Tabellen 9-11 angebrachte Jahresgrenzdosis für Augen, Schilddrüse und Keimdrüsen basiert auf den Veröffentlichungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (Bundesamt für Strahlenschutz, 2007).

Um dem Interventionisten einen Richtwert für die eigene Strahlenüberwachung zu liefern, wird in den nachfolgenden Untersuchungen die praxisalltägliche Untersucherposition gewählt, mit einer Entfernung von einem Meter zum Isozentrum, bei einem Winkel von 30° zur Tischmitte.

Diagnostische Angiografie

Erfahrungsgemäß werden während einer diagnostischen Angiografie 6-8 Serien benötigt. Für die Berechnung zur Überschreitung der gesetzlichen Jahresdosis bei der DSA wird der Maximalwert mit acht Serien pro Anwendung rechnerisch einbezogen.

Bei unsachgemäßer Anwendung der Strahlenschutzvorrichtung werden bereits nach wenigen Untersuchungen, bedingt durch die Multiplikation des Faktors acht, die jährlich festgelegten Grenzdosen schnell erreicht.

Ohne Strahlenschutzvorrichtungen wird die Grenzdosis für die Gonaden (50.000 μ Sv) bereits bei der zweiten diagnostischen Angiografie überschritten. Der Bleigummiaufsatz ist damit ein unverzichtbarer Schutz bei jeder Behandlungsform (Tab. 9) und sollte routinemäßig auf den Unterkörperstrahlenschutz aufgesteckt werden, um die Pro-

tektion der Keimdrüsen zu gewährleisten. Die Jahresgrenzdosis für die Schilddrüse wird mit sieben Untersuchungen und für die Augen mit fünf Untersuchungen ohne Einsatz der Strahlenschutzvorrichtung überschritten.

Unter Verwendung der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtung befindet sich die Anzahl der möglichen Untersuchungen pro Tag in einer Größenordnung, welche praktisch nicht erreicht werden kann.

Tab. 9 Maximale Anzahl der diagnostischen Angiografien pro Tag, die ohne Überschreitung der gesetzlich festgelegten Jahresgrenzdosis durchgeführt werden dürfen, mit und ohne gerätetechnische Strahlenschutzvorrichtung

<u>Maximale Anzahl der DSA-Untersuchungen pro Tag. Protokoll: "Carotis" 3B/s, in Untersucherposition</u>					
a) ohne Strahlenschutzvorrichtung					
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis	8 Serien*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	29,08 µSv	232,64 µSv	6
Augen	150 000 µSv	220	22,07 µSv	176,56 µSv	4
Gonaden	50 000 µSv	220	33,47 µSv	267,76 µSv	1
b) mit vollständiger Strahlenschutzvorrichtung					
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis	8 Serien*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	0,80 µSv	6,40 µSv	213
Augen	150 000 µSv	220	1,05 µSv	8,40 µSv	81
Gonaden	50 000 µSv	220	0,80 µSv	6,40 µSv	35
c) mit Strahlenschutzvorrichtung, ohne Bleigummiaufsatz					
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis	8 Serien*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	0,86 µSv	6,88 µSv	198
Augen	150 000 µSv	220	1,06 µSv	8,48 µSv	80
Gonaden	50 000 µSv	220	33,25 µSv	266,00 µSv	1
* die gemessene Dosis wird mit dem Faktor 8 multipliziert, da davon ausgegangen wird, dass acht Serien pro Untersuchung notwendig sind.					

Befund

Bei einem Befund wird zusätzlich zu den 6-8 Serien noch eine Rotation benötigt. Für die Berechnung der folgenden Tabelle 10 wurden die Ergebnisse der Dosis aus den Tabellen 9 und 8 addiert.

Ohne Strahlenschutzvorrichtung wird die Jahresgrenzdosis innerhalb weniger Befunduntersuchungen deutlich überschritten. Die genauen Werte sind aus Tabelle 10 zu entnehmen.

Tab. 10 Maximale Anzahl der Befunde pro Tag, die ohne Überschreitung der gesetzlich festgelegten Jahresgrenzdosis durchgeführt werden dürfen, mit und ohne gerätetechnische Strahlenschutzvorrichtung

<u>Maximale Befunduntersuchungen pro Tag in Untersucherposition</u>				
a) ohne Strahlenschutzvorrichtung				
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	351,04 µSv	4
Augen	150 000 µSv	220	284,36 µSv	2
Gonaden	50 000 µSv	220	380,56 µSv	0
b) mit vollständiger Strahlenschutzvorrichtung				
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	18,61 µSv	73
Augen	150 000 µSv	220	16,24 µSv	50
Gonaden	50 000 µSv	220	14,54 µSv	15
c) mit Strahlenschutzvorrichtung, ohne Bleiaufgummiaufsatz				
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	18,59 µSv	73
Augen	150 000 µSv	220	16,30 µSv	42
Gonaden	50 000 µSv	220	366,2 µSv	0
*eine Angiographie für das Protokoll 8s DS H addiert mit der Ortsdosis für acht DSA (Durchleuchtungszeit 6s, 3B/s)				

Interventionelle Angiografie

Für eine interventionelle Angiografie (z.B. Coiling eines Aneurysmas) führt der Interventionist aufgrund des komplexeren Behandlungsablaufs zwei Rotationen und mindestens zehn Serien durch. Dabei kann die Anzahl der Serien stark variieren.

Dadurch ist die Dosis, welche sich während einer Intervention aufsummiert, im Vergleich zu einem Befund oder einer diagnostischen Angiografie deutlich höher. Ohne Strahlenschutzvorkehrungen wird die Jahresgrenzdosis des praktizierenden Arztes bei einer arbeitstypischen Positionierung in Höhe der Gonaden, der Augen und der Schilddrüse bereits mit der ersten interventionellen Angiografie überschritten (Tab. 11).

Tab. 11 Maximale Anzahl der interventionellen Angiografien pro Tag, die ohne Überschreitung der gesetzlich festgelegten Jahresgrenzdosis durchgeführt werden dürfen, mit und ohne gerätetechnische Strahlenschutzvorrichtung

<u>Maximale Anzahl interventioneller Angiografien pro Tag, in Untersucherposition</u>				
a) ohne Strahlenschutzvorrichtung				
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	527,60 µSv	2
Augen	150 000 µSv	220	436,30 µSv	1
Gonaden	50 000 µSv	220	560,30 µSv	0
b) mit vollständiger Strahlenschutzvorrichtung				
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	32,42 µSv	42
Augen	150 000 µSv	220	26,18 µSv	26
Gonaden	50 000 µSv	220	24,28 µSv	9
c) mit Strahlenschutzvorrichtung, ohne Bleigummiaufsatz				
	Jahresgrenzdosis	Arbeitstage	gemessene Dosis*	maximale Untersuchungen/Tag
Schilddrüse	300 000 µSv	220	32,22 µSv	42
Augen	150 000 µSv	220	26,24 µSv	26
Gonaden	50 000 µSv	220	532,90 µSv	0
*zwei Angiografien für das Protokoll 8s DS H addiert mit der Ortsdosis für zehn DSA (Durchleuchtungszeit 6s, 3B/s)				

5.2 Notwendigkeit und Praktikabilität des gerätebezogenen Strahlenschutzes

Die Angiografie wird in der digitalen Radiografie immer bedeutender. Obwohl im Jahr der Anteil dieser Interventionen unter verschiedenen Untersuchungsarten nur bei 2% liegt, befindet sich der Anteil an der kollektiven, effektiven Strahlendosis im Jahr 2002 bei 17,1% (Bundesamt für Strahlenschutz 2005). Damit steigt die Notwendigkeit, einen sicheren Strahlenschutz am Untersuchungsort zu tragen. Dabei reicht in der interventionellen Radiologie und Angiografie der körperliche Strahlenschutz in der Regel nicht aus, sodass ein gerätebezogener Strahlenschutz, der in dieser Studie untersucht wurde, notwendig wird. Diese Dauereinrichtungen müssen während der Untersuchungen sicher und präzise zu bedienen sein und dürfen den Arbeitsablauf nicht behindern. Der Stand der heutigen Technik ist ein gelenkgeführter Oberkörperstrahlenschutz aus Bleiacrylglas mit einem Formkörperausschnitt zur Anpassung an den Patientenkörper. Damit wird für den Untersucher eine geschlossene Strahlenschutzzone geschaffen.

Messungen älterer Studien überschreiten trotz gerätebezogener Strahlenschutzvorrichtung die zulässige Körpergrenzdosis, vor allem auf Höhe der Augen (Eder 1995). Durch Einsatz von modernem Strahlenschutz wird eine Dosisreduktion um 90% erreicht. Dadurch wird die zulässige Körpergrenzdosis nicht überschritten. Der Abstand vom Boden zu den strahlensensiblen Organen hat nur eine geringfügige Auswirkung auf die Höhe der Dosis, während der Abstand vom Isozentrum zu einer deutlichen Dosisreduktion führt.

Dauereinrichtungen können einen weiträumigen Strahlenschatten bieten. Dieser kann durch das Abmaß der Strahlenschutzvorrichtung variiert werden. Bei der hier untersuchten Vorrichtung kann nur die Untersucherposition bei 30° als sicher gelten. Außerhalb dieses Bereiches muss zur Dosisreduktion ein größeres Abmaß gewählt werden. Dies kann wiederum nachteilig zu einer geringeren Mobilität der einzelnen Strahlenschutzvorrichtungen führen und somit den Workflow negativ beeinflussen.

Im Praxisalltag besteht dadurch immer wieder das Risiko eines fehlerhaften Aufbaus der Schutzvorrichtung. In manchen Interventionsräumen sind laut Untersuchungen keine vorschriftmäßigen Strahlenschutzschirme angebracht. Ohne körperlichen Strah-

lenschutz können hierbei Dosiswerte – Höhe Schulter und Augenlinse – von 2mSv pro Untersuchung erreicht werden. Bei der Arbeit unter diesen Bedingungen über einige Jahre wird sehr schnell der Schwellenwert für deterministische Schäden erreicht. Daher sollte im täglichen Arbeitsablauf immer zusätzlich der kommerzielle Strahlenschutz getragen werden, um eine durchschnittliche Dosisreduktion zwischen 20 und 25% zu erzielen (Vano et al. 1998b). Diese Dosis konnte in der vorliegenden Studie mit den eingesetzten Protokollen und der modernen Angiografieanlage mit Zweiebenen-C-Bogen-Systemen sowie neuester Detektor-Technologie nicht erreicht werden.

Aus Berichten von praktizierenden Interventionisten geht hervor, dass die Strahlenschutzvorrichtungen – v.a. der Bleigummiaufsatz – den Untersucher während der Interventionen in seinem Arbeitsablauf einschränkt. Eine Akzeptanz von zusätzlichen Strahlenschutzvorrichtungen kann nur durch eine gute Praktikabilität während des Untersuchungsablaufes gewährleistet werden. Schutzvorrichtungen, die nicht praxisgerecht sind, können zur Verlängerung der Durchleuchtungszeit führen.

Bei der Entwicklung von Schutzvorrichtungen kann nicht nur auf das einfache Handling geachtet werden, sondern ein weiterer Aspekt ist die Sterilisierbarkeit des Strahlenschutzes, um einen den Hygienerichtlinien entsprechenden Arbeitsablauf zu gewährleisten (Eder 1995).

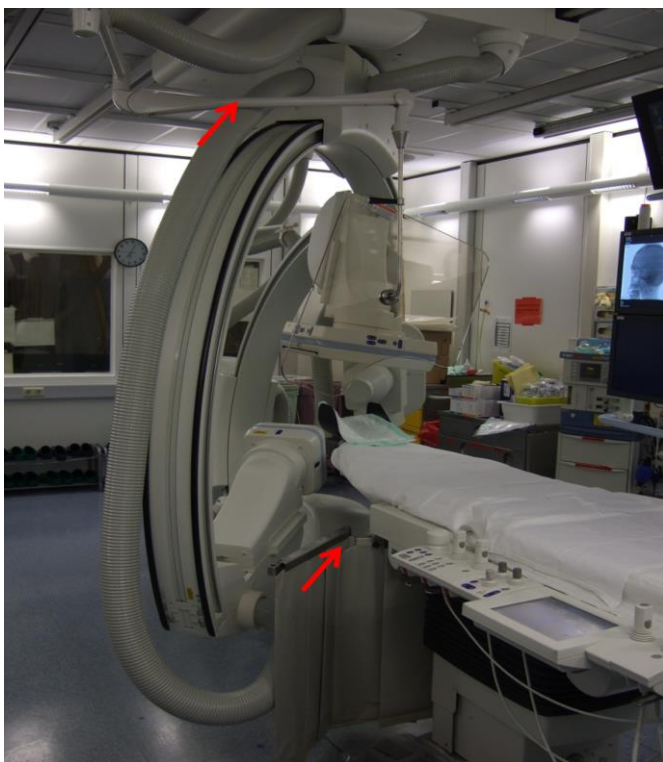


Abb. 17 Kollision des C-Bogen mit der Strahlenschutzvorrichtung

Nach unseren Erfahrungen wird die Mobilität des Tisches durch den Bleigummiaufsatz und die Deckenmontage erheblich eingeschränkt, sodass dieser nach Befragung der praktizierenden Ärzte häufig gar nicht eingesetzt wird. In vielen Untersuchungsabläufen ist die Röhrenposition nicht kompatibel mit der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtung. Um diese Problematik zu verdeutlichen, wurde eine typische Position der C-Arme während einer Intervention in Abbildung 17 festgehalten. Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Studie sollte eine andere Form der Strahlenschutzvorrichtung als die momentane Einrichtung gewählt werden, um eine praxistauglichere Variante des Strahlenschutzes zu erhalten. Durch flexible Bleilamellen, welche am Bleiacrylglas befestigt sind, kann eine höhere Mobilität der Einrichtung geboten werden. Damit wäre der Spalt zwischen dem Ober- und Unterkörperstrahlenschutz geschlossen, ohne den Bleigummiaufsatz als dritte Komponente aufstecken zu müssen. Diese Form des Oberkörperstrahlenschutzes ist bereits auf dem Markt erhältlich.

Einem Großteil der Interventionisten ist das Risiko einer deterministischen Strahlenschädigung bekannt und auch bewusst. Trotzdem existieren Studien, die eine zum

Teil sehr niedrige Sensibilität der praktizierenden Ärzte gegenüber radiologischer Strahlung belegen. Befragungen zufolge setzen nur 10% der Spezialisten für interventionelle Radiologie die Strahlenschutzvorrichtung ein (Niklas et al. 1993).

Der Behandler fühlt sich in seinem Arbeitsfluss eingeschränkt. Die Beweglichkeit des Patiententischs wird in seiner Mobilität deutlich reduziert. Strahlenschutzbrillen werden nur von einem sehr geringen Prozentsatz getragen, obwohl diese griffbereit zur Verfügung ständen. Die zur Verfügung stehenden Schutzbrillen werden aufgrund des geringen Tragekomforts während der Intervention als störend empfunden. Zusätzlich existiert die Anwendung einer Ringdosimetrie bei direkter Arbeit im Streustrahlenfeld. Auch diese wird nur sehr selten eingesetzt.

Die Messergebnisse in dieser Studie verdeutlichen, dass nicht nur der gerätetechnische Strahlenschutz ausschlaggebend für eine Reduzierung der Strahlenbelastung ist. Zusätzlich hat die Positionierung des Behandlers im Raum einen hohen Stellenwert.

Die Strahlenbelastung für Behandler und Assistenz konnte seit dem Einsatz einer Röntgenschutzwand im Jahr 1996 deutlich reduziert werden. Häufig reicht schon eine geringe Positionsänderung der Schutzvorrichtung oder auch des Untersuchers aus, um eine deutlich niedrigere Strahlenexposition zu erhalten (Pecher et al. 1998). Bei Rotationsangiografien kann eine erhebliche Strahlenreduktion bis zu 90% erreicht werden.

5.3 Strahlenexposition der Augenlinse

Bezogen auf ein Jahr besteht laut Bundesgesetzblatt für die Augenlinse ein festgelegter Dosisgrenzwert von 150 mSv (Bundesministerium der Justiz 2009). Dies gilt für das beruflich strahlenexponierte Personal ab dem 18. Lebensjahr. Die Augenlinse zählt zu den hoch strahlensensiblen Körperbereichen, welche durch ionisierende Strahlung deterministisch geschädigt werden können. Somit handelt es sich um eine kumulative Wirkung. In der Augenlinse werden durch die Strahlen Zellen zerstört, welche nicht mehr vom Körper regeneriert werden können. Die Schwellendosis für eine leichte Linsentrübung liegt laut Internationaler Schutzkommission bei 0,5 bis 2 Sv und für einen Katarakt bei 5 Sv (ICRP 1991). Rechnerisch wird bei einer Jahresdosis von 50 mSv über zehn bis zwanzig Jahre eine Linsentrübung erwartet. Studien haben

nachgewiesen, dass die gesetzlich festgelegten Jahresgrenzdosen zum Teil überschritten werden. Im Klinikum der Technischen Universität München wurden an modernen Angiografieanlagen Messungen zur Untersucherdosis vorgenommen. Die Durchleuchtungszeit wurde auf 5h / Woche festgelegt. Das Ergebnis ist eine Jahresdosis von 250 mSv, die um 100 mSv die gesetzlich definierten Grenzwerte überschreitet (Eder 1995).

Ohne Verwendung des gerätetechnischen Strahlenschutzes entsteht eine Überschreitung der Jahresgrenzwertdosis bereits bei zwei durchgeführten interventionellen Angiografien pro Tag bezogen auf 220 Arbeitstage pro Jahr.

Untersuchungen zu Folge werden 95 % der Streustrahlung bei einem Bleigleichwert von 0,5 mm absorbiert. Bei einem unvollständigen Einsatz des Strahlenschutzes nimmt die relative Schutzwirkung mit zunehmendem Abstand bis auf 50% ab.

Eine zusätzliche Dosisreduktion kann nur durch Tragen von Röntgenschutzbrillen mit zusätzlichem seitlichem Strahlenschutz erzielt werden. Dieser seitliche Schutz dient der Absorption lateral einfallender Strahlung auch bei Kopfbewegung des Untersuchers (MAVIG GmbH 2002). Besonders Interventionisten und Assistenzpersonal mit überdurchschnittlicher Körpergröße sollten diesen Strahlenschutz – zur Vermeidung von subkapsulären Katarakten – bei jeder Untersuchung tragen.

Während des jährlichen Treffens der RSNA im Jahr 2004 in New York wurden 59 praktizierende Radiologen, in einem Alter zwischen 29 und 62 Jahren, auf subkapsuläre Katarakte untersucht. Dabei hatte die Hälfte der Untersuchten eine strahleninduzierte Veränderung der Augenlinse. Fünf (8%) der untersuchten Radiologen wiesen einen positiven Befund auf, welcher darauf zurückzuführen ist, dass einige der Versuchspersonen während der Interventionen nicht die vorgeschriebenen Strahlenschutzvorrichtungen einsetzten. Dieses Ergebnis verdeutlicht das Ausmaß der Linsenschädigung, wenn auf Strahlenschutz verzichtet wird. Das Risiko, einen Katarakt zu entwickeln steigt mit zunehmendem Alter und den praktizierenden Jahren. Untersuchungen in Tierstudien ergaben, dass keine Strahlendosis als sicher gelten kann. Im Unterschied zur Altersschwersichtigkeit beginnt der strahleninduzierten Katarakt zunächst mit einer Trübung hinter der Linse. Diese führt zuerst zu einem Kontrastverlust und danach zu einem Sehschärfenverlust (Haskal und Worgul 2004). Daher wird diese Entstehungsart des Kataraktes erst sehr spät diagnostiziert.

Ohne Einsatz eines Strahlenschutzes können bei der Neuroembolisation pro Untersuchung Werte von 10 mSv an der Augenlinse gemessen werden. Bei einem typischen Arbeitspensum wird über einige Jahre des Praktizierens ohne Strahlenschutz hinweg der Schwellenwert für deterministische Schäden an der Augenlinse überschritten (Vano et al. 2008).

Die Schädigung der Augenlinse entsteht unter anderem auch durch den Einsatz von alten Röntgengeräten und inkorrekt durchgeführten Methoden. Der Strahlenschutz findet in einigen Kliniken keine Anwendung, bei damals gleichzeitigem Einsatz einer Obertischröhre. Damit wird das Risiko zu erkranken signifikant erhöht. Linsentrübungen durch Röntgenstrahlung konnten somit bei allen Untersuchern nachgewiesen werden (Vano et al. 1998a). Alte Röntgengeräte sowie Übertischröhren sollten in der interventionellen und kardiologischen Radiologie möglichst keine Anwendung mehr finden, um eine Überexposition der Augenlinsen zu vermeiden. Durch die richtige Anwendung der gerätetechnischen Strahlenschutzeinrichtung kann ein hoher Workflow in den Kliniken erfolgen, ohne die Jahresgrenzdosis nur annähernd zu erreichen.

5.4 Strahlenexposition der Schilddrüse

Die Literatur-Recherche ergibt für die Strahlenexposition der Schilddrüse eines Interventionisten fast keine aussagekräftigen Ergebnisse, vor allem im Bezug auf die Strahlenbelastung während einer DSA.

Röntgenstrahlung kann an der Schilddrüse durch Zellmutationen und -transformationen neoplastische Veränderungen verursachen. In bisherigen Studien wurde dabei speziell auf die Strahlenexposition der Patienten eingegangen. Eine deterministische Strahlenschädigung (Hyperthyreose) bei der DSA der hirnversorgenden Arterien wird beim Patienten ausgeschlossen. Die durchschnittlichen Strahlenschäden der Schilddrüse sind als gering einzustufen (Heyne et al. 1997).

Während einer Intervention sollte der Behandler zusätzlich zu der Bleischürze und der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtung einen Strahlenschutz für die Schilddrüse tragen, da diese mit einer Jahresgrenzdosis von 300 mSv zu den strahlensensiblen Organen des Körpers zählt.

Die effektive Dosis kann durch einen zusätzlichen Schilddrüsenschutz um einen Faktor von 1,7-3 bei einem Bleigleichwert von 0,35 reduziert werden. Daher sollte der

Schilddrüsenschutz ein grundsätzlicher Bestandteil der Schutzkleidung sein (von Boetticher et al. 2006). Hierdurch kann bei unbewusster Positionsänderung des Untersuchers aus dem gerätetechnischen Strahlenschutzschatten heraus eine bedeutende Dosisreduktion der Streustrahlung nicht gewährleistet werden, zumal die Schilddrüsendosis tendenziell höher liegt als in Höhe der Augenlinsen. Dieses Phänomen wird auf einen konstant größeren Abstand der Augen zur Strahlenquelle im Vergleich zur Schilddrüse zurückgeführt, was ebenfalls in älteren Studien belegt wird (Faulkner und Moores 1982).

5.5 Strahlenexposition der Gonaden

Für die Keimdrüsen ist ein jährlicher Grenzwert von 50 mSv durch das Bundesamt für Strahlenschutz festgelegt (Bundesamt für Strahlenschutz 2007). Sie gehören damit zu den strahlensensibelsten Organen. Trotzdem gibt es keine genauen literarischen Angaben über eine Dosismessung im Bereich der Gonaden für das beruflich exponierte Personal. Als Vorsichtsmaßnahme sollte bei möglicher Schwangerschaft ein Dosimeter sowohl über als auch unterhalb der Bleischürze getragen werden, um die effektive Dosis besser kontrollieren zu können (Franken und Huyskens 2002).

Bereits die zweite diagnostische Angiografie mit jeweils acht Serien pro Tag führt ohne Strahlenschutzvorrichtung zur Überschreitung des jährlichen Schwellenwerts. Die Dosis, welche der Radiologe außerhalb seines persönlichen Strahlenschutzes akquiriert, kann durch Abschirmung und zusätzliche Vorsichtsmaßnahmen essentiell reduziert werden. Dazu zählt der gerätetechnische Bleigummiaufsatz, der speziell dem Schutz der Gonaden dient. Dies gilt besonders bei umfangreichen interventionellen Angiografien. Ohne Schutzvorkehrungen ist eine Überschreitung der Jahresgrenzdosis vorprogrammiert. Während beim vollständigen Strahlenschutz die ursprünglich vorhandene Dosis für alle Abstände auf etwa 5% reduziert wird, bietet der unvollständige Einsatz des Strahlenschutzes für die Gonaden in 100 cm Entfernung vom Isozentrum keinerlei Schutz gegenüber dem vollständigen Verzicht auf Strahlenschutzvorrichtungen.

5.6 Anwendungen mit häufiger Strahlenüberexposition

Berufliche Strahlenüberexposition in der Medizin kann bei unterschiedlichen Anwendungen entstehen. In der vorliegenden Studie stehen die Rotationsangiografie und die DSA-Serie im Vordergrund. Sowohl bei der Rotationsangiografie als auch bei der DSA-Serie kann der Radiologe direkt am Patiententisch oder durch ferngesteuerte Auslösemechanismen das Untersuchungsprogramm starten.

Zusätzlich sollte eine Differenzierung zwischen Untertischröhre mit einer niedrigeren Streustrahlung zur Übertischröhre erfolgen. Bei dieser Studie wurde ausschließlich mit einer hochmodernen Angiografieanlage gearbeitet. Diese ist mit neuester Technologie ausgestattet. Hierzu zählt unter anderem die Untertischröhre. Das Dosisverhältnis der Strahlung vom Detektor zur Röhre beträgt laut Studien 1:10 (Wucherer und Loose 2005, Kuon et al. 2004). Bei Tätigkeit des Radiologen direkt am Patienten mit Übertischröhre tritt eine hohe Exposition durch direkte Streustrahlung auf. Hierbei ist der Einsatz sowohl der gerätebezogenen Schutzvorrichtung als auch des persönlichen Strahlenschutzes essentiell. Aufgrund dieser Messungen gilt der heutige Einsatz von Übertischröhren nicht mehr als Standard.

Die Rotationsangiografie unterscheidet sich von der DSA-Serie durch eine wesentlich höhere Durchleuchtungszeit, die eine höhere Strahlenexposition bedingt. Mit vollständigem Strahlenschutz kann das Verhältnis DSA/ Rotationsangiografie 0,1 erreichen. Die Strahlenexposition durch eine Rotationsangiografie ist damit 10-mal so groß wie bei einer DSA. Die Indikationsstellungen für DSA-Serie und Rotationsangiografie sind in der Praxis verschieden. Eine DSA kann meistens nicht anstelle einer Rotation erfolgen. Trotzdem ist dieses Verhältnis bedeutend, um die Sensibilität des Untersuchers und des Assistenzpersonals zu erhöhen.

Die durchschnittliche Strahlenbelastung der verschiedenen Arbeitsfelder beträgt 0,09 mSv/Jahr. Deutlich höhere Durchschnittswerte werden in den Bereichen Kardiologie (0,26 mSv/Jahr) und Radiologie (0,19 mSv/Jahr) erreicht (Lefaire und Croft 2003). Daher ist es besonders wichtig, dem Personal in diesen Teilgebieten einen hohen, standardgemäßen Strahlenschutz zur Verfügung zu stellen.

Durch die Anzahl der steigenden Untersuchungen und das möglichst zeitige reduzieren der Patientenwartelisten werden die Interventionen pro Woche erhöht, obwohl die Strahlenschutzvorrichtungen häufig nicht optimal sind.

5.7 Notwendigkeit der Personendosimetrie

Bei Tätigkeit im Kontrollbereich müssen Personendosimeter unterhalb der Schutzkleidung an repräsentativen Körperoberflächen getragen werden (Wucherer und Loose 2005). Dies gilt für alle sich in der Nähe von radiologischer Strahlung aufhaltenden Ärzte und MTAs. Trotzdem wird häufig vergessen, das Filmdosimeter vor einer Intervention an die OP-Kleidung umzustecken.

Um eine gesicherte, präzise Strahlendosisüberwachung des Behandlers zu gewährleisten empfiehlt die ICRP und die U.S. National Council on Radiation Protection & Measurements, v.a. bei interventionellen Verfahren, zwei Dosimeter zu tragen. Eines oberhalb und eines unterhalb der Schutzkleidung, zur besseren Abschätzung der Dosis ungeschützter Körperregionen (Valentin 2000).

Problematisch ist die Dosiserfassung in Höhe der Augen. Hierbei können verschiedene Parameter Einfluss auf die Sekundärstrahlung an der Augenlinse haben. Dazu zählen eine variierende Winkelangulation des C-Bogens, veränderte Distanzen zum Patienten, unterschiedlich komplexe Prozeduren, Strahlenschutzbrillen und Einsatz eines gerätebezogenen Strahlenschutzes. Voraussetzung ist hierfür eine regelmäßige Standardqualitätskontrolle der Angiografieanlage. Verstärkende Faktoren der Strahlenexposition sind die Angulation der C-Bögen, die Nähe des Untersuchers zum Patienten und komplexere Behandlungsformen (interventionelle Angiografie). Vermindernd wirkt der Einsatz von Strahlenschutzbrillen und gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtungen (Vano et al. 2008). Diese aufgeführten Punkte sind nur unter besonders hohen Anforderungen mittels Personendosimetrie zu erfassen.

In der beruflichen Strahlenüberwachung wie bei der interventionellen Radiologie stehen häufig offene Fragen bezüglich der Dosimetrie im Raum. Diese Unsicherheit führt nicht selten zu einer falschen oder auch gar keiner Anwendung der persönlichen Do-

simetrie. Ein kontinuierlicher Gebrauch der Dosimeter ist somit bei Physikern und anderem Personal meist nicht üblich (Vano et al. 2008).

Regelmäßige Personendosimetrie ist nicht immer Standard (Niklason et al. 1993).

Das Risiko, durch Strahlung zu erkranken, wird von vielen praktizierenden Radiologen unterschätzt, da Strahlung bei geringen Dosen primär nicht zu einer Beeinträchtigung der körperlichen Konstitution führt. Häufig hat Strahlung erst durch einen Summationseffekt über viele Jahre Auswirkung auf eine körperliche Beeinträchtigung, z.B. die Bildung eines Kataraktes.

Fimlplakettendosimeter werden von amtlichen Messstellen erfasst und mit der Personendosis gleich gesetzt. Die Fimlplaketten werden üblicherweise unterhalb der Bleischürze getragen. Dadurch sind ungeschützte Körperbereiche wie Hände oder Augen einer numerisch nicht erfassten Exposition ausgesetzt (Fischer et al. 1995).

Sowohl in der interventionellen- als auch in der Kardio-Radiologie ist der Radiologe häufig direkt neben dem Patienten positioniert, um Untersuchungen mit Kathetern unter radiologischer Kontrolle direkt am Patienten durchführen zu können. In der vorliegenden Untersuchung fand die Bestimmung der Dosiswerte für die Augen, die Schilddrüse und die Gonaden statt. Nicht mit einbezogen wurde die Strahlenexposition der Hände, welche hier aber trotzdem erwähnt werden soll. Sie nimmt einen besonderen Stellenwert ein. Die Auswertung und Evaluierung der an den Extremitäten in Studien ermittelten Dosen unterliegt besonders hohen Anforderungen. Dabei müssen die entstandenen Strahlen in den Bewegungsablauf der Hände während einer Intervention mit einbezogen werden (Vano und Guibelalde 2002).

Eine Routineüberwachung der Handdosimetrie ist wenig praktikabel. Sie ist abhängig vom Untersuchungsablauf, von der Positionierung des Dosimeters an der Handfläche und kann gravierend zwischen Niedrig- und Hochdosis während einer Behandlung schwanken. Die optimale Position des TLD- Dosimeters ist am kleinen Finger. Beim Tragen des TLD- Dosimeters am Mittelfinger wird die gemessene Dosis um 10- 30% unterschätzt (Whitby und Martin 2002).

Eine relative Neuheit ist das elektronische Ringdosimeter, welches von den Interventionisten getragen werden kann, um die Strahlenexposition der Hände im Strahlengang

beurteilen zu können. Die elektronische Überwachung der Hände wird als „Advanced Extremity Gamma Instrumentation System“ (AEGIS) bezeichnet (Marx und Ellis 1996). Dieses System ermöglicht während einer Intervention eine kontinuierliche Überwachung der Handdosis, sodass ungünstige, stark strahlenbelastende Bewegungen sofort evaluiert werden können. Bei den älteren, kleinen Thermolumineszenz-dosimetern gab es keine Möglichkeit, die Dosis zu separieren und einzelnen Bewegungen im Behandlungsablauf zuzuordnen. Der Hauptnutzen für den Interventionisten ist die Optimierung der Strahlenexposition während der Durchführung der Behandlung. Weniger soll dieses neue elektronische Ringdosimeter der kontinuierlichen Strahlenüberwachung dienen. Die Aufgabe dieses Dosimeters ist es darzustellen, welches Protokoll, welche Positionierung der Hand und welche Technik die Strahlenexposition des Interventionisten reduzieren kann. Während einer Untersuchung kann sich der Behandler auf Video aufnehmen. Im Anschluss soll das elektronische Ringdosimeter mit Hilfe des Videos ausgewertet werden, mit anschließender Evaluierung zur Optimierung des eigenen Behandlungsablaufs (Martin et al. 2002).

5.8 Zusätzliche Möglichkeiten der Dosisreduktion

5.8.1 Zusatzfunktionen an der Angiografieanlage

Das Axiom Artis (d)BA ist mit Zusatzfunktionen ausgestattet, welche zu einer Strahlendosisreduktion beitragen sollen. Die gepulste Durchleuchtung (CAREPOSITION), führt im Vergleich zur kontinuierlichen Durchleuchtung zu einer Dosisersparung von 90% bei 3 Pulsen/s. Im Durchleuchtungsbild ist dabei keine Qualitätsänderung festzustellen. Diese Ergebnisse wurden bei einem Multistar-T.O.P. der Firma Siemens ermittelt. Fazit ist, dass ein Zehntel der Dosis einer kontinuierlichen Durchleuchtung ausreicht, um trotzdem noch eine gute Bildqualität gewährleisten zu können (Waggershauser et al. 1995). Hinsichtlich der Wahrnehmung sind keine Unterschiede bezüglich gepulster (15 Pulse/Sekunde, 10 Pulse/Sekunde, 7,5 Pulse/Sekunde) und kontinuierlicher Durchleuchtung (30 Pulse/Sekunde) festzustellen. Die Dosisreduktion beträgt dabei 22%, 38% bzw. 49% (Aufrichtig et al. 1994).

Ebenfalls wird eine Dosisersparung durch Verwendung des Modus „last image hold“ sowie des „road mapping mode“ erzielt. Dabei wird die Strahlenexposition signifikant reduziert.

Nur mit einem gezielten Aufwand und regelmäßiger Weiterbildung des radiologischen Personals kann eine deutliche Dosisreduktion um ca. 35% erreicht werden (Wanke und Ewen 2006). Hierfür sind regelmäßige Fort- und Weiterbildung, um die Strahlenexposition weiter zu reduzieren, essentiell. Eine Kombination aus Einsatz der dosisreduzierenden Modi der Röntgeneinrichtung und Optimierung der gerätebezogenen Strahlenschutzvorrichtung ist ideal. Dies ist in der Praxis mit einigem Aufwand verbunden, da gerade bei komplexen radiologischen Anwendungen wie der Coilembolisation eine lang andauernde Anpassungsphase notwendig wird. Der korrekte Aufbau der drei Komponenten der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtung muss sowohl von den Interventionisten als auch vom Assistenzpersonal in Fortbildungen einstudiert und zur Routine werden, um die Untersuchungen am Patienten nicht unnötig zu verlängern.

Bei der Rotationsangiografie ist die optimale Ausgangsposition der C-Arme die „Untertischröhre“ in der Vertikalen und in der Horizontalen die untersucherferne Position (Vano et al. 2008, Marx und Ellis 1996). Bei einer waagerechten Tischposition ist die effektive Dosis bei einem Obertischbetrieb der Röntgenröhre etwa doppelt so hoch wie bei einem Untertischbetrieb (von Boetticher et al. 2006).

5.8.2 Engere Indikationsstellung

Das Risiko einer Kataraktentstehung, Ausbildung eines Schilddrüsenkarzinoms bzw. einer Hyperthyreose ist im Durchschnitt, bei Beachtung der Strahlenschutzvorkehrungen, zu vernachlässigen. Trotzdem sollte der behandelnde Arzt zum eigenen Schutz eine kritische, interdisziplinäre Indikation zur Angiografie stellen. Hierbei muss die klinische Relevanz mit optimaler Nutzung der Strahlung für den Patienten immer im Mittelpunkt stehen. Bei einer subtilen Aneurysmasuche, wie sie bei einer Subarachnoidalblutung indiziert ist, können hohe Dosiswerte entstehen (Heyne et al. 1997). Da der Interventionist zur Diagnosesicherung und Behandlung notwendige Untersuchungen durchführen muss, sollte er auf seinen eigenen Strahlenschutz achten. Blutungen können zum Tode führen, daher ist die Darstellung von zusätzlichen Ebenen in vielen

Fällen notwendig. Dies führt ebenfalls zu einer erhöhten Streustrahlenexposition. Durch sorgfältige Evaluierung der Notwendigkeit einer Angiografie und eventueller Möglichkeit des Ausweichens auf MR-Angiografie oder andere Verfahren kann die DSA nicht nur ergänzt, sondern zum Teil auch ersetzt werden. Dies bedeutet auf der einen Seite eine Verringerung der Strahlenexposition für den Patienten und auf der anderen auch eine Streustrahlenreduktion für den Interventionisten. Die Rotationsangiografie generiert eine im Verhältnis zur DSA deutlich höhere Sekundärstrahlung (Verhältnis 10:1) und sollte nur nach enger Indikationsstellung zum Einsatz kommen.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Dosisersparung bildet das ALARA-System (*as low as reasonably achievable*). Ein Vorschlag ist die Einteilung in indikationsabhängige Bildqualitätsklassen. Diese Implementierung würde deutliche Veränderungen im Arbeitsablauf mit sich bringen. Eine enge Kommunikation unter den zuweisenden Behandlern mit zusätzlich erhöhtem Aufwand wäre erforderlich und somit schwer im klinischen Alltag umzusetzen. Wichtig sind regelmäßige Standardqualitätskontrollen, um eine Abstimmung der Geräteketten und damit auch eine Dosisoptimierung (unter anderem Röhre, Generator, Detektor und Workstation) zu erhalten (Uffmann et al. 2008).

5.8.3 Problematik der Filmkontrolle in der digitalen Technik

Durch die Bildprozessierung können Aufnahmefehler in der digitalen Technik kompensiert werden und damit zur leichtfertigen Handhabung führen. Die Beziehung Dosis-Bildkontrast ist bei den digitalen Verfahren nicht mehr vorhanden. Damit steht bei Überdosierung die optische Filmkontrolle – Filmschwärzung – nicht zur Verfügung. Sogar eine Dosiserhöhung über den Faktor 10 hinaus ist auf dem digitalen Bild nicht sichtbar (Uffmann et al. 2008). Daher ist es in der digitalen Radiografie besonders essentiell, zum eigenen Schutz eine persönliche Dosiskontrolle durchzuführen.

5.8.4 Weiter- und Fortbildung in der interventionellen Radiologie

Die Problematik ist das unzureichende Strahlenschutztraining in der interventionellen Radiologie. Eine Dosisoptimierung kann nur durch ständige Fort- und Weiterbildung

des Interventionisten erfolgen (Vano und Guibelalde 2002). Durch die Faszination der immer moderneren technologischen Möglichkeiten, die einen Fortschritt in der interventionellen Radiologie bewirken, tritt die eigene Strahlenschutzvorkehrung häufig weiter in den Hintergrund. Zusätzlich steigt die Komplexität der neuen Röntgeneinrichtungen, sodass ein Training zur Erlernung des richtigen Umgangs in Bezug auf Strahlenexposition notwendig wird. Die Europäische Kommission unterstützt das Projekt MARTIR (**M**ultimedia and **A**udiovisual **R**adiation Protection **T**raining in **I**nterventional **R**adiology), bestehend aus Strahlenschutz, Qualitätskontrolle und individueller Trainings CD-Rom (MARTIR 2002). Eine zusätzliche Problematik ist die unzureichende Differenzierung zwischen Strahlenschutz des Patienten und des Interventionisten. Für einen schnellen Behandlungsablauf zur Dosisreduktion des Patienten wirkt ein aufwändiger gerätetechnischer Strahlenschutz während der Intervention blockierend. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung der Strahlenbelastung des Behandlers.

Die Komplexität der interventionellen und kardiologischen Röntgengeräte macht eine gründliche Unterweisung notwendig. Hierbei ist eine Unterweisung durch am Arbeitsplatz schon länger tätige Personen unzureichend (Vano und Guibelalde 2002).

Wir empfehlen ebenfalls eine Verbesserung in der Weiter- und Fortbildung vor allem in der interventionellen Radiologie, um die Sensibilität der Radiologen aufrecht zu erhalten. In einigen oben aufgeführten Studien sowie in unserer Arbeit wird deutlich, dass die Aufklärung über die relativ hohe Gefahr von deterministischer Schädigung häufig nur unzureichend ist. Zwar besteht eine eingeschränkte Praktikabilität des Bleigummiaufsatzes, trotzdem sollte die Schutzvorrichtung aus Bequemlichkeit nicht einfachheitshalber an die Seite gelegt werden. Der Aufbau der drei gerätebezogenen Komponenten des Strahlenschutzes sollte im Rahmen von Fortbildungen immer wieder trainiert werden.

Mit Hilfe des Strahlenschutzbeauftragten der jeweiligen Abteilung kann ebenfalls eine Dosisreduktion des strahlenexponierten Personals erzielt werden. Durch regelmäßige periodische Aufklärung durch Kurse, welche für jeden verständlich sein müssen, kann ein sicherer Umgang des Personals mit den Röntgengeräten gewährleistet werden. Diese Aufgabe nimmt viel Zeit und Aufwand in Anspruch, welche der Strahlenschutzbeauftragte noch zusätzlich zu seinen Hauptaufgaben als Physiker und Techniker meistern muss (Menechal und David 2002).

5.8.5 Persönlicher Strahlenschutz

Zusätzlich zum gerätetechnischen Strahlenschutz sollte der Untersucher einen persönlichen Strahlenschutz tragen. Trotz der gerätetechnischen Schutzeinrichtungen kann hinter der Abschirmung Strahlung von bis zu 5% gegenüber dem vollständigen Einsatz des Strahlenschutzes gemessen werden. Zurzeit werden bleihaltige und bleifreie Produkte auf dem Markt angeboten.

Vorteil der bleifreien Schutzkleidung ist eine deutliche Reduktion der Umweltbelastung (Eder et al. 2005) und eine Gewichtsreduktion um bis zu 30% (Hubbert et al. 1993). Durch die im bleifreien Material entstehende Sekundärstrahlung kann der Schutz jedoch bis zu 70% verringert werden. Daher können die Bleigleichwerte auf den bleifreien Kleidungsstücken irreführend sein (Eder et al. 2005).

Der persönliche Strahlenschutz sollte passgenau sein. Zusätzlich zur gerätebezogenen Strahlenschutzvorkehrungen kann eine Reduzierung der effektiven Dosis von bis zu 75-90% erfolgen. Häufig reicht, bei gutem Sitz der Strahlenschutzkleidung, eine Bleistärke von 0,25 mm aus. Bei einer hohen Frequenz von interventionellen Eingriffen sollte zusätzlich ein Schilddrüsenschutz getragen und die Bleistärke auf 0,35 mm erhöht werden (Franken und C, 2002).

5.9 Empfehlung

Durch den Gebrauch der gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtung sowie die Änderung von einzelnen Untersuchungsparametern lässt sich die Strahlenexposition um etwa 90% reduzieren. Um einen sicheren, persönlichen Schutz vor radiologischer Sekundärstrahlung zu gewährleisten, sind im folgenden Abschnitt einige Empfehlungen/Verhaltensregeln genannt:

- a) Die gerätetechnische Strahlenschutzvorrichtung, bestehend aus den drei untersuchten Komponenten (deckengeführtes Strahlenschutzschild und Unterkörperschutz mit Aufsatz). Diese sollte vor jeder Untersuchung vollständig aufgebaut werden. Hierbei liegt laut vorliegenden Ergebnissen ein besonderer Wert in dem häufig nicht verwendeten Bleigummiaufsatz. Der gerätetechnische Strahlenschutz ersetzt dabei nicht den persönlichen Strahlenschutz.

- b) Zusätzlich zur gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtung sollte bei jeder Untersuchung eine Strahlenschutzbrille sowie eine Schilddrüsenabdeckung getragen werden.
- c) Die optimale Schutzwirkung ist nur an der Position des Untersuchers gegeben. Personal außerhalb dieses Strahlenschutzschattens wird einer bis zu 10mal höheren Strahlenexposition ausgesetzt und sollte sich daher nicht dort aufhalten.
- d) Die einfachste Maßnahme, um eine Reduktion der Sekundärstrahlung zu erhalten, ist der möglichst weite Abstand des Untersuchers zum Austrittsstrahlenfenster. Während der Angiografie kann dies durch maschinelle Druckinjektion geschehen, sodass eine Rotation fern des Patiententisches durchgeführt werden kann.
- e) Die Änderung und Optimierung der Untersuchungsparameter durch „last image hold“ CAREPOSITION oder CAREVISION liefert eine zusätzliche, deutliche Dosisreduktion.
- f) Regelmäßige Aufklärungen sollten durch den Strahlenschutzbeauftragten durchgeführt werden. Zusätzlich kann eine eigene Fortbildung mit Hilfe des MARTIR sinnvoll sein, um auf dem Wissen des neuesten technischen Standes zu sein.

6 Zusammenfassung

Neben der konventionellen Digitalen Subtraktions-Angiografie (DSA) werden insbesondere seit Einführung der Angiographiesysteme mit Flachdetektor-Technologie zunehmend auch Rotationsangiografien und DYNA-CTs durchgeführt. Ziel der Studie ist die Bestimmung der Strahlenexposition für den Untersucher bei DSA-Serien im Vergleich zu Rotationsangiografien an einem biplanen Angiographiesystem unter Berücksichtigung gerätetechnischer Strahlenschutzvorrichtungen.

Die Untersuchung erfolgte an einem biplanen Angiographiesystem mit Flachdetektor-Technologie (AxiomArtis dBA, Siemens). Die Strahlenexposition wurde als Ortsdosis in Höhe der Augen, Schilddrüse und Gonaden eines stehenden Untersuchers mit dem Dosimeter UMO LB 123 (Berthold) bestimmt. Alle Messungen wurden sowohl mit als auch ohne deckengeführtes Strahlenschutzschild und Unterkörperschutz mit Aufsatz durchgeführt. Die Messorte wurden in unterschiedlichen Abständen und Winkeln zum Isozentrum gewählt. Der Patient wurde durch ein Alderson-Phantom simuliert.

Die Messergebnisse ergaben eine 90%ige Reduzierung der Strahlenexposition des Untersuchers durch die Strahlenschutzvorrichtung am Tisch. Für einen wirksamen Gonadenschutz ist der Aufsatz zum Unterkörperschutz unverzichtbar. Die optimale Schutzwirkung ist nur an der Position des Untersuchers nachweisbar; Personal direkt neben dem Untersucher ist einer bis zu 10mal größeren Strahlenexposition ausgesetzt. Die Strahlenexposition des Untersuchers ist bei der Durchführung einer Rotationsangiografie (8s DS H) auch unter Berücksichtigung aller gerätetechnischen Strahlenschutzvorrichtungen 9 bis 10fach höher, verglichen zu einer DSA-Serie in Standardprojektionen (6s, 3 Bilder/s).

Die Strahlenexposition des Untersuchers an einem biplanen Angiographiesystem kann durch gerätetechnische Strahlenschutzvorrichtungen erheblich reduziert werden. Hochdosisprotokolle für Rotationsangiografien sollten auf ihre Notwendigkeit überprüft werden.

7 Literaturverzeichnis

Anschütz M (2008): Einführung in die digitale Radiografie. Radiopraxis 2, 83 – 91

Aufrichtig R, Xue P, Thomas C, Gilmore G, Wilson D (1994): Perceptual comparison of pulsed and continuous fluoroscopy. Med Phys 21, 245-256

Bundesamt für Strahlenschutz: Röntgendiagnostik – schädlich oder nützlich; in: Strahlenthemen; hrsg. v. Bundesamt für Strahlenschutz; Harzdruckerei Werningerode, Salzgitter 2005, 3,4

Bundesamt für Strahlenschutz : Bekanntmachung der Grenzwerte im beruflichen Strahlenschutz; hrsg. v. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter 2011 (http://www.bfs.de/de/ion/beruf_schutz/grenzwerte.html)

DIN 6814-3: Begriffe in der radiologischen Technik – Teil 3: Dosisgrößen und Dosis-einheiten, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2001

DIN 6814-5: Begriffe in der radiologischen Technik – Teil 5: Strahlenschutz, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2008

DIN EN 61331-3: Strahlenschutz in der medizinischen Röntgendiagnostik – Teil 3: Schutzkleidung und Gonadenschutz, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2002

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

Eder H, Panzer W, Schöfer H (2005): Ist der Bleigleichwert zur Beurteilung der Schutzwirkung bleifreier Röntgenschutzkleidung geeignet. Fortschr Röntgenstr 177, 399-40

Ewen K, Huhn W, Schimmel R, Wellner U: Strahlenschutz; in: Handbuch diagnostische Radiologie, Band I: Strahlenphysik, Strahlenbiologie, Strahlenschutz; hrsg. v. Freyschmidt J; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2003, 263-296

Faulkner K, Moores B (1982): An assesment of the radiation dose received by staff using fluoroskopopic equipment. Br J Radiol 55, 272-276

Fischer H, Przetak C, Teubert G, Ewen K, Mödder U (1995): Die Strahlenexposition des Radiologen bei Angiographien: Dosismessung außerhalb der Bleischürze. Fortschr Röntgenstr 162,2, 152-156

Franken Y, Huyskens C (2002): Guidance on the use of protective lead aprons in medical radiology/Protection efficiency and correction factors for personal dosimetry. In Paper 17, Sixth European ALARA Network Workshop. Madrid, Spain

Haskal Z. J, Worgul B V (2004): Interventional radiology carries occupational risk for cataracts. RSNA News 2004, 14, 6, 5-6

Hermann KP: Grundlagen – Digitale Mammographie; in: Röntgenmammographie; hrsg. v. Fischer U, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2003, 3-19

Heyne J-P, Schleicher C, Söldner J, Neumann R (1997): Strahlenexposition der Augenlinse und der Schilddrüse bei der digitalen Subtraktionsangiographie der hirnversorgenden Arterien. Fortschr Röntgenstr 167,5, 479-485

Hubbert T, Vucich J, Armstrong M (1993): Lightweight aprons for protection against scattered radiation during fluoroscopy. Am J Roentgenol 161, 1079-1081

Internationale Strahlenschutzkommission ICRP: Empfehlungen der Internationalen Schutzkommission 1990. ICRP Veröffentlichung; hrsg. v. Bundesamt für Strahlenschutz; Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1993

Kuon E, Empen K, Reuter G, Dahm J (2004): Höhe und Röhrenangulation als Determinante der möglichen Untersucher- Ortsdosisleistung in der invasiven Kardiologie. Fortschr Röntgenstr 176, 739-745

Lefauve C, Croft J (2003): Overview of medical occupational exposure stakes in the European States. In Paper 1, Sixth European ALARA Network Workshop. Madrid, Spain

Martin C, Whitby M, Hilditch T, Anstee D (2002): Use of an elektronische Finger Dosimeter in optimisation of Finger Doses. In Paper 19, Sixth European ALARA Network Workshop. Madrid, Spain

Marx M, Ellis J (1996): Radiationprotection of the hand in interventional radiology: Should it fit like a glove? Radiology 200, 24-25

MAVIG GmbH (2002): Röntgenschutzbrillen; in MAVIG Strahlenschutz und Systemtechnik., 5

Menechal P, David C (2002): Importance of the Radiation Safety Officer in the Optimisation of occupational Doses. In Paper 22, Sixth European ALARA Network Workshop. Madrid, Spain

Multimedia and Audiovisual Radiation Protection Training in Interventional Radiology (MARTIR): 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: envradprot@cec.eu.int)

Niklas L, Marx M, Chan H (1993). Interventional radiologists: occupational radiation doses and risks. Radiology 187, 729-733

Pecher G, König H, Pecher S, Gosch D, Voigt P, Schulz H-G (1998): Reduktion der Strahlenexposition in der interventionellen Angiographie für Patient und Untersucher. Fortschr Röntgenstr 169,5, 505-09

Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung; Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 159; 39. Jahrgang, 29. Juni 1996

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 Gemeinschaft Nr. L 180; 40. Jahrgang, 9. Juli 1997

Schröder U G, Schröder B S: Strahlenschutzkurs für Mediziner, 2. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart 2007

Shrimpton PC, Wall BF, Fisher ES (1981): The tissue-equivalence of the Alderson Rando anthropomorphic phantom for x-rays of diagnostic qualities. *Phys Med Biol* 26: 133–139

Strahlenschutzkommission: Interventionelle Radiologie. Empfehlung der Strahlenschutzkommission verabschiedet in der 217. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 20./21. September 2007, Bundesanzeiger Nr. 38a; 4

Strahlenschutzverordnung: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen - Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001; in Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 38; hrsg. v. Bundesministerium der Justiz; Bundesanzeiger Verlag, Bonn 2001, 1714 - 1846

Strotzer M, Völk M, Feuerbach S (2002): Flachdetektoren in der digitalen Radiographie. *Deutsches Ärzteblatt* 99: A-2484

Uffmann M, Schaefer-Prokop C, Neitzel U (2008): Abwägen von Dosisbedarf und Bildqualität in der digitalen Radiographie. *Radiologe* 48, 249-257

Vano E, Gonzales L, Beneytez F, Moreno F (1998 a): Lens injuries induced by occupational exposure in nonoptimized interventional radiology laboratories. *Br J Radiol*, 728-733

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

Vano E, Guibelalde E (2002): Training in Radiation Protection for Interventional Radiology. In Paper 25, Sixth European ALARA Network Workshop. Madrid, Spain

Vano E, Gonzalez L, Fernandez J M (September 2008): Eye Lens Exposure to Radiation in Interventional Suites: Caution is Warranted. *Radiology* 248, 945-953

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen – Röntgenverordnung vom 8. Januar 1987 BGBl Teil I, 114 in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2003. BGBl Teil I; 604

von Boetticher H, Lachmund J, Hoffmann W, Luska G (2006): Optimierung des Strahlenschutzes für das Personal in der Radiologie auf Grundlagen der effektiven Dosis. Fortschr Röntgenstr 178, 287-291

Waggershauser T, Herrmann K, Schätzl M, Reiser M (1995): Einsparungen bei der Durchleuchtungsdosis durch moderne DSA-Anlagen. Radiologe Volume 35, 148-151

Wanke I, Ewen K (2006): Reduzierung der Strahlenexposition für Patienten und Untersucher bei radiologischen Interventionen am Beispiel der Coilembolisation. Fortschr Röntgenstr 178, 103-108

Whitby M, Martin C (2002): Extremity Dose to Interventional Radiologists. In Paper 12, Sixth European ALARA Network Workshop. Madrid, Spain

Wucherer M, Loose R (2005): Berufliche Strahlenexposition. Radiologe 45, 291-303

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Für die kompetente Hilfe bei kleinen und größeren Fragestellungen.

Besonders für die engagierte und zuverlässige Betreuung danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. M. Knauth. Er hat mir bei der Ausarbeitung des Themas viel Freiraum gelassen und entscheidende Verbesserungsvorschläge gegeben.

Darüber hinaus bedanke ich mich herzlich bei meinem Betreuer Dr. K. Hermann für die statistisch-physikalische Unterstützung und Beratung sowie die Hilfe bei der Entstehung des Versuchsaufbaus.

Bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Sara Pilgram-Pastor und Dr. Jan Buhk, die mir während der Anfangszeit dieser Arbeit Anregungen für verschiedene Experimente gaben.

Lebenslauf

Ich, Tatiana Friedrichs, geb. von Keil, wurde am 18. November 1983 in Bielefeld als Tochter meiner Eltern Wolf-Dieter von Keil, Diplom Betriebswirt, und Dorothee von Keil, geb. von Mitzlaff, Physiotherapeutin, geboren. Ich bin verheiratet mit Bernhard Friedrichs, Lufthansa-Pilot. Wir haben eine kleine Tochter namens Theresa.

Von 1990 bis 1994 besuchte ich die Theodor-Heuss-Grundschule in Bad Soden am Taunus und 1994 bis 2003 das Gymnasium der St. Angela Schule in Königstein Taunus, wo ich im Juni 2003 meine Allgemeine Hochschulreife erlangte.

Vom Oktober 2003 bis zum Dezember 2008 habe ich mein Studium der Zahnmedizin an der Georg-August-Universität zu Göttingen absolviert. Im September 2004 legte ich die Naturwissenschaftliche Vorprüfung und im April 2006 die Ärztliche Vorprüfung ab. Im Dezember 2008 schloss ich das zahnärztliche Studium mit dem Staatsexamen ab und erhielt die Approbation als Zahnärztin.

Seit 2009 arbeite ich, erst als Vorbereitungsassistentin, jetzt als angestellte Zahnärztin in der Zahnarztpraxis Dres. Marc und Astrid Baumstieger in Darmstadt, mit Tätigkeitsschwerpunkt Kieferorthopädie.