

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Dosiermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung
in der medizinischen Heilkunde, Zahnmedizinischen Heilkunde,
Tierheilkunde und bei Grenzkontrollen mit ionisierender
Strahlung - Vorhaben 3604S04434**

**Auftragnehmer:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig**

U. Ankerhold

O. Hupe

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-57/12

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201202217466

Salzgitter, Februar 2012

Abschlussbericht zum Vorhaben 3604S04434

„Dosisermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der medizinischen Heilkunde, zahnmedizinischen Heilkunde, Tierheilkunde und bei Grenzkontrollen mit ionisierender Strahlung“

Hauptauftragnehmer:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Fachbereich 6.3 „Strahlenschutzdosimetrie“
Ansprechpartner: Frau Dr. Ulrike Ankerhold
Herr Dr. Oliver Hupe

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Unterauftragnehmer 1:

TÜV NORD EnSys Hannover GmbH & Co. KG
Ansprechpartner: Herr Dipl.-Ing. Helmut Kreienfeld
Am TÜV 1
30519 Hannover

Unterauftragnehmer 2:

Albers-Schönberg-Institut
Röntgenabteilung der Asklepios Klinik St. Georg
Ansprechpartner: Herr Prof. Dr. Hermann Vogel
Lohmühlenstraße 5
20099 Hamburg

Fachliche Betreuung:

Bundesamt für Strahlenschutz
Fachgebiet SG 2.3
Herr Dr. Dietmar Noßke
Ingolstädter Landstr. 1
85764 Oberschleißheim (Neuherberg)

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Verfassers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Verfasser: Dr. U. Ankerhold (PTB) und Dr. O. Hupe (PTB)

Braunschweig, 15. Februar 2008

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Aufgabenstellung	5
2	Verwendete Messgeräte	5
3	Teilbereich 1: „Dosiermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der medizinischen Heilkunde, zahnmedizinischen Heilkunde, Tierheilkunde“	9
3.1	Motivation	9
3.2	Durchführung	9
3.2.1	Bereich Tiermedizin	9
3.2.2	Bereich Human- und Zahnmedizin	13
3.3	Messergebnisse Tier-, Human- und Zahnmedizin	16
3.3.1	Bereich Tiermedizin	16
3.3.2	Bereich Human- und Zahnmedizin	17
3.3.3	Unsicherheitsbetrachtung	18
3.4	Diskussion	19
4	Teilbereich 2: „Dosiermittlung bei Grenzkontrollen mit ionisierender Strahlung“	21
4.1	Motivation	21
4.2	Funktionsprinzip von Röntgenscannern	21
4.3	Messungen	22
4.4	Messergebnisse	24
4.5	Anmerkungen	25
5	Erfolgskontrollbericht	27
5.1	Zusammenfassung	
5.2	Ausblick	28
5.3	Kosten- und Zeitplanung des Vorhabens	28
6	Literaturverzeichnis	29
7	Im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 erstellte Veröffentlichungen und Präsentationen	30

1. Aufgabenstellung

Das Vorhaben gliedert sich in zwei Teilbereiche:

Der erste Teilbereich ("Helfende Personen") beschäftigt sich mit der Dosisermittlung bei helfenden Personen: Die Ermittlung der Körperdosis ist für Personen erforderlich, die sich in Kontrollbereichen aufhalten (§ 40 Abs. 1 Satz 1, § 81 Abs. 5 Satz 3 Strahlenschutzverordnung und § 25 Abs. 5 Satz 3, § 35 Abs. 1 Satz 1 Röntgenverordnung). Zu diesem Kreis gehören neben den beruflich strahlenexponierten Personen auch die helfenden Personen in der Human- und Zahnmedizin und Personen in der Tierheilkunde, die Tiere während der Untersuchung halten (§ 37 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2b StrlSchV, § 22 Abs. 1 Nr. 2b RöV). Ziel der Untersuchungen für diesen Teilbereich war es zu ermitteln, welche Dosis diese Personen bei typischen Untersuchungsszenarien erhalten und wie häufig helfende Personen eingesetzt werden.

Der zweite Teilbereich ("Durchleuchtungseinrichtungen") des Vorhabens bezieht sich auf die Anwendung ionisierender Strahlung für die Kontrolle von LKWs und Personen. Durchleuchtungseinrichtungen mit Röntgenstrahlung kommen international an Grenzen, Flughäfen, Seehäfen, etc. immer häufiger zum Einsatz. Ziel der Untersuchungen dieses Teilbereichs war es, die Orts- und Personendosis-Werte bei kommerziell erhältlichen Anlagen zu bestimmen. Auf Wunsch des A4-Ausschusses der SSK wurden zusätzlich im Rahmen des Vorhabens Dosismessungen an der Container-Durchleuchtungsanlage im Hamburger Hafen durchgeführt.

Alle Dosiswerte sollten in den aktuellen Strahlenschutz-Messgrößen und rückführbar auf das SI-System ermittelt werden.

2. Verwendete Messgeräte

Für die beiden Teilbereiche des Vorhabens waren die Messbedingungen aufgrund der Tatsache, dass in beiden Bereichen gepulste Photonen-Strahlungsfelder – hohe Dosisleistung im kurzen Puls und gleichzeitig kleine Dosiswerte (wenige Mikrosievert) pro Puls – eingesetzt werden, sehr ähnlich. Für die Optimierung der Messungen vor Ort ist eine direkte Anzeige des Dosiswerts erforderlich. Des Weiteren ist es, um den Einfluss der natürlichen Umgebungsstrahlung gering zu halten, bei Dosiswerten in der Größenordnung weniger Mikrosievert notwendig, die Messgeräte zeitnah auslesen zu können.

Bei den Untersuchungen für den Teilbereich "Helfende Personen" kam außerdem hinzu, dass die Messungen vor Ort den routinemäßigen Ablauf der Röntgenuntersuchungen nicht beeinflussen durften, d.h. die helfenden Personen mussten schnell mit Messgeräten bestückt werden. Komplexere Messaufbauten konnten daher hierfür nicht eingesetzt werden.

Da die helfenden Personen sich bewegen und auch unterschiedliche Haltepositionen je nach momentaner Situation einnehmen, ist es trotz gleichem Aufnahmeszenarium nicht möglich, Wiederhol-Messung durchzuführen. Somit ist ein Aufsummieren der geringen Dosiswerte zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses nicht sinnvoll.

Aufgrund der oben genannten Anforderungen wurden für die Messungen im Rahmen des Vorhabens die in den Abbildungen 1 bis 4 dargestellten Messgeräte ausgewählt:

Zum einen wurden zwei Sekundärnormal-Ionisationskammern verwendet: In Abbildung 1 ist die $H^*(10)$ -Sekundärnormal-Ionisationskammer HS01 (Kugelkammer, Volumen 1000 cm^3) [1] für die Messgröße Umgebungs-Äquivalentdosis mit der zugehörigen speziellen Messelektronik dargestellt. Abbildung 2 zeigt die $H_p(10)$ -Sekundärnormal-Ionisationskammer (Flachkammer, Volumen 10 cm^3) [2] für die Tiefen-Personendosis, angeschlossen an dieselbe spezielle Messtechnik. Beide Kammeren zeichnen sich durch eine geringe Energieabhängigkeit ihres Ansprechvermögens aus. Außerdem sind ihre Ansprechvermögen über einen großen Dosis- und Dosisleistungsbereich nahezu konstant.

Für die Messungen mit den Ionisationskammern wurde eine spezielle Elektronik entwickelt. Mit ihr ist es möglich, die bei den kurzen Bestrahlzeiten entstehende, sehr geringe Ladungsmenge von der durch Leckströme oder Störungen erzeugten Ladung zu trennen. Kernstück der Elektronik ist ein in der PTB entwickeltes Elektrometer zur Ladungsmessung. Außerdem enthält sie ein Hochspannungsmodul für die Kammeranspannung, Sensoren für die Messung der Temperatur, Luftfeuchte und des Luftdrucks sowie einen Laptop mit spezieller Mess- und Auswerte-Software. Für die Messungen vor Ort war es erforderlich, diese Messtechnik transportabel zu gestalten.

Um die Einsetzbarkeit der Ionisationskammern in den jeweiligen gepulsten Feldern zu prüfen, wurde vor Ort mit baulich unterschiedlichen I-Kammern (Kugel- und Flachkammer) gemessen. Des Weiteren wurden für Plausibilitätsbetrachtungen die Messungen in unterschiedlichen Abständen und mit verschiedenen Kammeranspannungen durchgeführt. Damit konnten Sättigungseffekte bei der Ladungssammlung ausgeschlossen werden. Durch Messungen in der PTB konnte ein Einfluss der zeitlichen „Teilausleuchtung“ der Ionisationskammern, bedingt durch den Scan-Vorgang bei Röntgenscannern, ausgeschlossen werden.

Die beiden ausgewählten elektronischen Dosimeter besitzen eine Bauartzulassung und erfüllen damit die entsprechenden Bauartanforderungen. Der geprüfte Photonen-Energiebereich (ab 16 keV bzw. 30 keV) umfasst den bei den Messungen auftretenden Bereich, so dass sie auch für die Messung der niederenergetischen Streustrahlung geeignet sind. In der Abbildung 3 ist das elektronische Personendosimeter EPD Mk2 mit den zugehörigen Kenndaten abgebildet. Das verwendete elektronische Ortsdosimeter FH40G-L10 mit der Angabe der Kenndaten ist in Abbildung 4 zu sehen.

Im Display beider Dosimeter werden die Dosiswerte nur in $1 \mu\text{Sv}$ -Schritten angezeigt. Mit der optionalen Infrarotschnittstelle der Dosimeter ist es jedoch möglich, die Dosiswerte in $0,01 \mu\text{Sv}$ -Schritten auszulesen, was gerade bei den kleinen Dosiswerten im Bereich "Helfende Personen" erforderlich ist. Das EPD Mk2 hat einen bauartzugelassenen Dosis-Messbereich von $10 \mu\text{Sv}$ bis 10 Sv . Vorab wurde daher in der PTB überprüft, dass die Dosisanzeige unterhalb $10 \mu\text{Sv}$ die PTB-Anforderungen erfüllt.

Bisher gibt es noch keine Angaben über die Eignung von bauartzugelassenen Dosimetern in gepulsten Strahlungsfeldern. Aus diesem Grund wurden verifizierende Messungen in den jeweiligen Strahlungsfeldern vor Ort durchgeführt: Die Dosiswerte,

die mit den Ionisationskammern ermittelt wurden, wurden mit denjenigen der kommerziellen Dosimeter verglichen. Für den Bereich „Durchleuchtungseinrichtungen“, wo im direkten Nutzstrahl gemessen wurde, lagen die Dosisleistungen im Puls oberhalb der bauartzugelassenen Dosisleistungsbereiche. Es zeigte sich, dass nur bedingt verlässliche Messungen mit den elektronischen Dosimetern möglich waren. Beim Teilbereich "Helfende Personen" wurde hingegen ausschließlich im Streustrahlungsfeld und nicht im direkten Strahl gemessen. Hier lagen die Dosisleistungen im bauartzugelassenen Bereich, so dass die EPD Mk2-Dosimeter für diese Messungen eingesetzt werden konnten.

Im Bereich „Helfende Personen“ wurde nur mit den EPD Mk2 – Dosimetern oberhalb der Bleischürze gemessen. Dies war notwendig, weil die auftretenden Dosiswerte so klein waren, dass eine Messung unterhalb der Schutzkleidung nicht möglich ist. Daher gelten die ermittelten Dosiswerte für helfende Personen, die unbeabsichtigt keine Schutzkleidung tragen. Bei einigen Messungen vor Ort waren nicht ausreichend viele helfende Personen anwesend, so dass die Dosimeter ohne Rückstreukörper auf Stativen aufgebaut werden mussten. Der Einfluss unterschiedlicher bzw. fehlender Rückstreukörper auf die Messung wurde im Vorfeld für diesen Dosimetertyp und für die entsprechenden Strahlungsfelder ermittelt. Der angezeigte Dosiswert änderte sich selbst bei fehlendem Rückstreukörper um weniger als 2 %.

Zur Wahrung der Rückführbarkeit aller ermittelten Dosiswerte auf Primärnormale wurden die verwendeten Messgeräte in der PTB in den typischen diagnostischen Strahlungsfeldern und den nach Angabe der Röntgenscanner-Hersteller (Hochspannung und Filterung) nachgebildeten Strahlungsfeldern kalibriert.

Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Messtechnik und der durchgeführten Kalibrierungen ist in [3] zu finden.



Abbildung 1: $H^*(10)$ -Sekundärnormalionisationskammer (HS01, Mitte) mit der speziellen Messelektronik, bestehend aus dem Temperatur- und Feuchte-Sensor (links) sowie den Elektronik-Einschüben und dem Laptop (rechts).

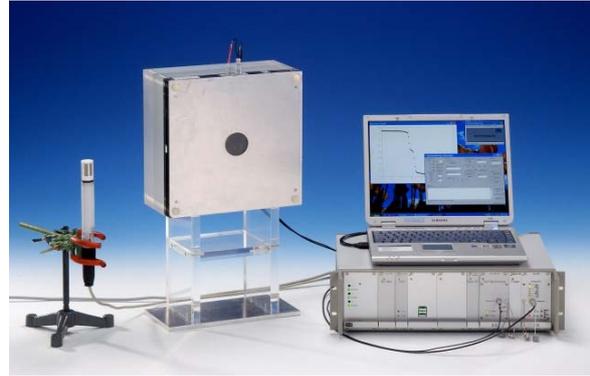


Abbildung 2: $H_p(10)$ -Sekundärnormalionisationskammer mit der zugehörigen Messelektronik (siehe Abb 1).

Messsystem	1000 cm ³ - Ionisationskammer mit PTB-Spezialelektronik
Energiebereich	12 keV – 7 MeV

Messsystem	10 cm ³ - Ionisationskammer mit PTB-Spezialelektronik
Energiebereich	12 keV – 7 MeV



Abbildung 3: Elektronisches Personendosimeter EPD Mk2 von Thermo Electron (Erlangen) auf einem Quader-PMMA-Phantom.



Abbildung 4: Elektronisches Ortsdosimeter FH40G-L10 von Thermo Electron (Erlangen).

Detektor	Halbleiterdiode
Energiebereich	16 keV bis 7 MeV
Dosisleistungsbereich	50 nSv/h bis 1 Sv/h
Dosis-Messbereich*	10 µSv bis 10 Sv
PTB bauartzugelassen	

Detektor	Proportional-Zählrohr
Energiebereich	30 keV bis 4,4 MeV
Dosisleistungsbereich	500 nSv/h bis 100 mSv/h
Dosis-Bereich*	0,5 µSv bis 1 Sv
PTB bauartzugelassen	

* Die optionalen IR-Schnittstellen ermöglicht die Auslesung von Dosiswerten größer gleich 0,01 µSv (nicht bauartgeprüft).

3. Themenbereich 1: „Dosisermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der medizinischen Heilkunde, zahnmedizinischen Heilkunde, Tierheilkunde“

3.1 Motivation

Die Ermittlung der Körperdosis ist für Personen erforderlich, die sich in Kontrollbereichen aufhalten (§ 40 Abs. 1 Satz 1, § 81 Abs. 5 Satz 3 Strahlenschutzverordnung und § 25 Abs. 5 Satz 3, § 35 Abs. 1 Satz 1 Röntgenverordnung). Zu diesem Kreis gehören neben den beruflich strahlenexponierten Personen auch die helfenden Personen in der Human- und Zahnmedizin und Personen in der Tierheilkunde, die Tiere während der Untersuchung halten (§ 37 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2b StrlSchV, § 22 Abs. 1 Nr. 2b RöV).

Ziel der Untersuchungen war es, eine Datenbasis als Grundlage für die Entscheidung zu erarbeiten, in welcher Weise die Dosis helfender Personen bestimmt werden kann oder ob sogar generell auf eine Dosisermittlung verzichtet werden könnte.

3.2 Durchführung

In Gesprächen mit Sachverständigen, Vertretern von Ärztekammern und bei Hospitationen in verschiedenen Kliniken wurden die häufigsten repräsentativen Untersuchungsszenarien ermittelt. Die hierbei auftretenden Dosis-Werte für die helfenden Personen wurden gemessen. Die Strahlenexposition entsteht durch die am zu untersuchenden Objekt gestreute Strahlung. Bei Einhaltung der Strahlenschutzvorkehrungen befinden sich die helfenden Personen ausschließlich in diesem Streustrahlungsfeld.

Da von vornherein nicht klar ist, wie die helfende Person zum Objekt steht und welche Körperbereiche letztlich bestrahlt werden – insbesondere trifft dies bei Tieruntersuchungen zu – wurde für die Auswahl der Messinstrumente von einer Ganzkörper-Exposition der helfenden Personen ausgegangen. D.h. als Messgröße wurde die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ verwendet. Die Richtigkeit dieser Vorgehensweise bestätigte sich dann bei den Beobachtungen vor Ort in den Kliniken: bei Einhaltung der Strahlenschutzvorkehrungen wird bei helfenden Personen fast ausschließlich der Körperrumpf bestrahlt.

Die Schwierigkeiten bei den Messungen im Teilbereich "Helfende Personen" waren zum einen, dass aufgrund der Bewegung der Patienten keine Wiederhol-Messungen möglich waren, und dass zum anderen nur bei einer begrenzten Anzahl von Röntgenaufnahmen gemessen werden konnte.

Die Kalibrierung und die Prüfung auf Eignung der Messinstrumente erfolgten sowohl vorab in der PTB als auch in den Strahlungsfeldern vor Ort, siehe Kapitel 2.

3.2.1 Bereich Tiermedizin

Für die Untersuchungen dieses Bereichs wurde eine Unterteilung in Röntgenuntersuchungen von Großtieren und von Kleintieren vorgenommen. Hintergrund hierfür

sind die unterschiedlichen Streueigenschaften aufgrund der Größe der Tiere und u.U. die anderen Positionen der helfenden Personen im Streu-Strahlungsfeld. Bei Kleintieren sind die häufigsten Patienten Hunde und Katzen, bei den Großtieren sind dies Pferde. Für Nutztiere, wie z.B. Kühe, Schweine und Schafe, wird meist aus Kostengründen auf Röntgenuntersuchungen verzichtet.

In der Tiermedizin sind die helfenden Personen meist die Tierbesitzer bzw. die Tierbetreuungspersonen. Ihre Aufgabe besteht im Wesentlichen darin, das Tier während der Röntgenuntersuchung zu beruhigen und zu fixieren. Bei Röntgenuntersuchungen von Pferden gehört oftmals auch das Assistieren des Tierarztes, z.B. Halten der Filmkassette, zu den Aufgaben der helfenden Person.



Abbildung 5: Untersuchung eines Pferdebeins, links „vor-Ort“-Situation, rechts Klinik-Situation.

In der Abbildung 5 (links) ist eine typische „vor-Ort“-Situation einer Röntgenuntersuchung des Pferdebeines zu sehen. Das Positionieren der Röntgenanlage erfolgt durch eine beruflich strahlenexponierte Personen, i.A. der Tierärztin. Das Beruhigen des Pferdes und auch unter Umständen das Halten der Röntgenplatte, kann durch eine nicht beruflich strahlenexponierte, helfende Person erfolgen. Bei Untersuchungen, die in einer Praxis oder Klinik (Abbildung 5, rechts) durchgeführt werden, ist die Situation anders. Hier steht i.A. die Tierbetreuungsperson zur Beruhigung am Kopf des Pferdes, eine beruflich strahlenexponierte Praxis-Mitarbeiterin hält die Filmkassette.

Die Messungen an realen Kleintieren (Hund und Katze) erfolgten in der Tierärztlichen Hochschule Hannover (Allgemeine Radiologie und Medizinische Physik). Die Messungen an Großtieren (Pferd) wurden im Pferdezentrum Fister (Bilsen, SH) durchgeführt.

Im Pferdezentrum wurde in der Routine, d.h. im Klinik-Alltag, gemessen. Es wurden nur Personendosimeter des Typs EPD Mk2 eingesetzt. Wichtig war, dass die Dosimeter schnell befestigt und schnell ausgelesen werden konnten. Wie schon in Kapitel 2 dargestellt, ist der Einsatz komplexer Messaufbauten bei diesen Gegebenheiten nicht möglich. Bei jeder helfenden Person wurden mehrere (3 bis 5) Dosimeter (siehe Abbildung 3) mit Hilfe von Klettbandern oberhalb der Schutzkleidung an unterschiedlichen Körperstellen befestigt, siehe Abbildung 5 und 6. Die Messungen konnten auf diese Weise durchgeführt werden, weil das Ansprechvermögen des EPD Mk2-

Dosimeters nur wenig von der Art und der Anwesenheit eines Rückstreukörpers abhängt (siehe Kapitel 2). Durch die Bewegung der Personen und der Tiere konnte nicht erreicht werden, dass alle Dosimeter zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme optimal ausgerichtet waren. Hieraus ergibt sich insgesamt, dass die maximal angezeigte Dosis aller Dosimeter bei einer Röntgenaufnahme als die Personendosis für diese Untersuchung angesehen wird.



Abbildung 6: Die EPD Mk2 wurden mittels Klettbandern an den helfenden Personen befestigt.

Bei der Bestimmung der Dosis helfender Personen bei Kleintier-Untersuchungen wurde nicht im Klinik-Alltag gemessen. Zunächst wurden die Streueigenschaften von kleinen Tieren mit Hilfe von zwei speziell entwickelten Tier-Phantomen genau untersucht: ein Katzen-Phantom und ein Hunde-Phantom (siehe Abbildungen 7 und 8). Die Phantome wurden komplett aus PMMA („Plexiglas“) gefertigt. Ziel war es, die Dosis und die Winkelverteilung der Streustrahlung zu bestimmen.



Abbildung 7: Katzen-Phantom "Mary", gefertigt aus PMMA.



Abbildung 8: Hunde-Phantom "Kira", gefertigt aus PMMA.

Für die Messungen mit den Phantomen wurden an der 120kV-Röntgenanlage der PTB die in der Tiermedizin verwendeten Röntgenstrahlungsfelder nachgebildet. Gemessen wurde die Dosis im Streustrahlungsfeld sowohl mit den EPD Mk2-Dosimetern als auch mit der $H^*(10)$ -Sekundärnormal-Kammer. Zur Absicherung der ermittelten Ergebnisse wurden vom Vorhabenspartner, TÜV NORD EnSys, Monte-Carlo-Simulationsrechnungen mit dem Programmpaket MCNP durchgeführt. In Abbildung 9 ist die Dosis der am Katzen-Phantom gestreuten Strahlung bei verschiedenen Winkeln dargestellt: einmal die mit der $H^*(10)$ -Sekundärnormal-Kammer (HS01) gemessenen und zum anderen die berechneten Werte (MCNP). Aus der Winkelabhängigkeit ist deutlich zu erkennen, dass unter 90° zur Einfallsrichtung des Nutzstrahls (Einfall aus 180°) die geringste Dosis auftritt. Dies ist zum Teil durch die Winkelverteilung der Compton-Photonen, jedoch im Wesentlichen durch die Absorptionseigenschaften des bestrahlten Objekts, begründet.

Insgesamt zeigen die Messungen und die Simulationsergebnisse eine gute Übereinstimmung.

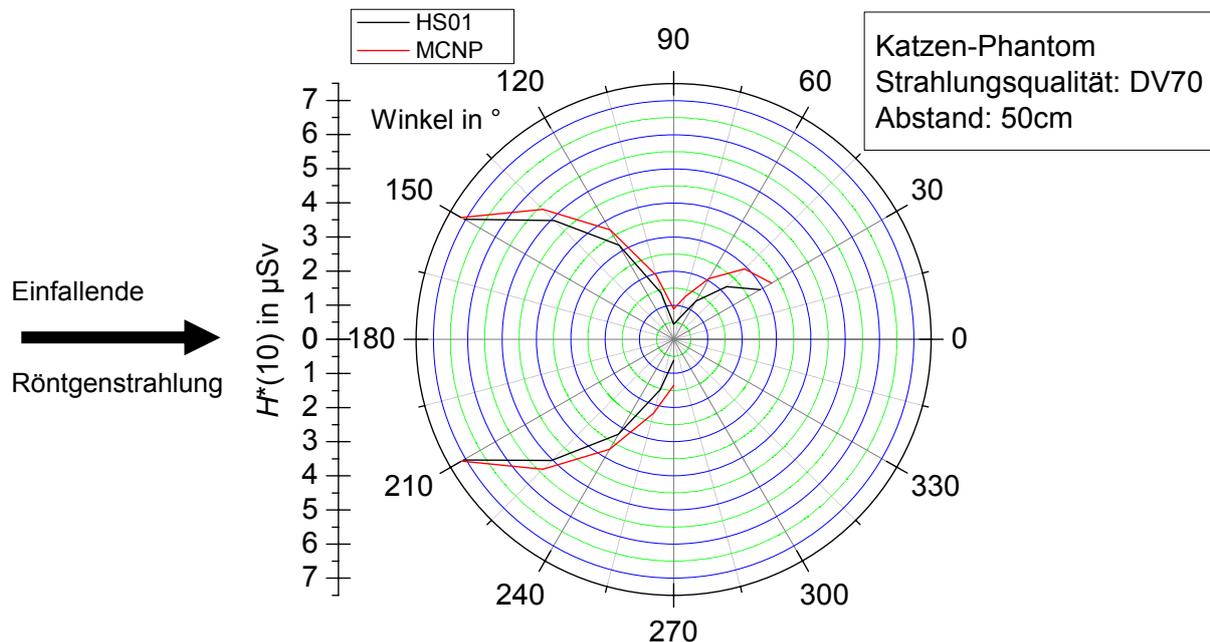


Abbildung 9: Vergleich Monte-Carlo-Simulationsrechnung (MCNP) und Messung (HS01) am Katzen-Phantom aus PMMA an der Röntgenanlage der PTB. Der Nutzstrahl kommt von links (180°) und trifft senkrecht aus das dazu quer liegende Katzen-Phantom.

In der Tierärztlichen Hochschule wurden anschließend an einer tiermedizinischen Röntgenanlage Messungen mit den Tier-Phantomen als Streukörper und zum Vergleich einige Messungen mit realen Tieren durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, die Abweichungen betragen maximal 15 %.

Insgesamt zeigen die Messungen und Simulationen, dass die Dosis für die helfende Person in einem Winkelbereich von ca. $\pm 45^\circ$ zur Einfallsrichtung des Nutzstrahls (von 135° bis 225° in der Abbildung 9) am größten wäre. Jedoch würden Positionen dicht am Nutzstrahl (Winkelbereich 150° bis 210° in der Abbildung 9) dazu führen, dass die helfende Person eine Exposition durch den einfallenden Nutzstrahl erhält, was aus Strahlenschutzgründen verhindert werden sollte.

3.2.2 Bereich Human- und Zahnmedizin

Die Erhebungen, die bezüglich des Einsatzes von helfenden Personen im Bereich der Humanmedizin mit Unterstützung der Kassenärztlichen Vereinigung Niedersachsen/Bremen durchgeführt wurden, zeigten, dass helfende Personen fast ausschließlich nur im Bereich der Orthopädie zur Beruhigung von Kindern, älteren oder behinderten Menschen eingesetzt werden. Im Bereich der Zahnmedizin werden fast keine helfenden Personen benötigt. Bei zahnmedizinischen Röntgen-Aufnahmen ist es technisch bedingt notwendig, dass die Patienten alleine ruhig sitzen können, so dass

die Anwesenheit einer helfenden Person nicht erforderlich ist. Eventuelle Begleitpersonen verlassen den Röntgenraum für die kurze Zeit einer Aufnahme.



Abbildung 10: Röntgenaufnahme des Beckens mit helfender Person.

In der Abbildung 10 ist die Untersuchungssituation bei einer Röntgenaufnahme des Beckens bei einem ca. 3 Jahre alten Mädchen zu sehen. Die Mutter als helfende Person steht ca. 0,6 m entfernt am Kopf des Kindes. Die Messungen im Bereich Humanmedizin erfolgten in den Röntgenabteilungen des Annastifts in Hannover, des Herzogin Elisabeth Hospitals in Braunschweig und der Orthopädie des Universitätsklinikums Magdeburg.

Für den Bereich Zahnmedizin wurde in der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Medizinischen Hochschule Hannover gemessen. Die Situation bei einer typischen zahnmedizinischen Panorama-Röntgenaufnahme ist in Abbildung 11 zu sehen. Die möglicherweise anwesende helfende Person säße auf dem Stuhl. Die helfende Person befindet sich bei einer derartigen Untersuchung in einem Abstand von ca. 0,8 m zur untersuchenden Person.



Abbildung 11: Panorama-Röntgenaufnahme des Gebisses. Die helfende Person würde auf dem linken Stuhl sitzen.

Die Messungen wurden, wie bei den Untersuchungen für die Großtiere (siehe Kapitel 3.2.1), folgendermaßen durchgeführt: Bei jeder helfenden Person wurden mehrere (3 bis 5) Dosimeter des Typs EPD Mk2 (Abbildung 3) mit Hilfe von Klettbandern oberhalb der Schutzkleidung an unterschiedlichen Körperstellen befestigt (siehe Abbildung 5 und 6). Die maximal angezeigte Dosis aller Dosimeter bei einer Röntgenaufnahme wurde als die Personendosis für diese Untersuchung interpretiert.

Bei Untersuchungen, bei denen keine ausreichende Anzahl helfender Personen zur Verfügung stand, hat sich entweder das strahlenschutzüberwachte Klinik-Personal bereit erklärt, als helfende Person zu fungieren, oder es wurden die Dosimeter auf Photo-Stativen aufgebaut (siehe Abbildung 12). In der Zahnmedizin wurden die Dosimeter in Ermangelung realer helfender Personen, wie in Abbildung 11 zu sehen, auf dem Stuhl positioniert. Die Messungen konnten auf diese Weise durchgeführt werden, da das Ansprechvermögen der EPD Mk2-Dosimeter nur gering davon abhängt, ob und wenn ja, welcher Rückstreukörper vorhanden ist, siehe Kapitel 2.



Abbildung 12: Röntgenuntersuchung eines Knies. Die Dosis aufgrund von Streustrahlung wurde mit den auf Photo-Stativen befestigten Dosimetern des Typs EPD Mk2 gemessen.

3.3 Messergebnisse Tier-, Human- und Zahnmedizin

3.3.1 Bereich Tiermedizin

Die Streustrahlungsdosis und damit die Dosis der helfenden Person ist abhängig von den eingestellten Werten der Parameter Röhrenhochspannung, Röhrenstrom-Zeit-Produkt (mAs-Produkt) und der Feldgröße sowie von der verwendeten Filterung, dem Winkel der helfenden Person zum Streukörper (Winkelabhängigkeit der Compton-Streuung), der Streukörpergeometrie und dem Abstand zum Streukörper. Je nach Untersuchungsszenarium werden andere Werte dieser Parameter verwendet.

Für typische Untersuchungsszenarien ergeben sich für die helfenden Personen die in der Tabelle 1 und 2 angegebenen Dosiswerte. Im Bereich Kleintiere befindet sich die helfende Person im Mittel ca. 0,5 m vom Streuobjekt entfernt. Im Bereich Großtiere liegt der mittlere Abstand bei ca. 0,8 m.

Tabelle 1: Typische Untersuchungen bei Kleintieren mit den zugehörigen Parametern. Die mit den EPD Mk2-Dosimetern oberhalb der Schutzkleidung gemessenen Dosiswerte beziehen sich jeweils auf eine Aufnahme.

Untersuchung	U_{HV} in kV	I in mA	$I \cdot t$ in mAs	Feldgröße in cm x cm	$H_p(10)$ in μ Sv
Katze, Bauch	50	125	10	18 x 18	1,5
Katze, Bauch	70	320	16	18 x 18	5
Hund, Bauch	85	320	10	18 x 18	9
Hund, Brust	70	320	16	29 x 29	23
Hund, Kopf	60	400	12,5	18 x 18	2

Tabelle 2: Typische Untersuchungen bei Großtieren mit den zugehörigen Parametern. Die mit den EPD Mk2-Dosimetern oberhalb der Schutzkleidung gemessenen Dosiswerte beziehen sich jeweils auf eine Aufnahme.

Untersuchung	U_{HV} in kV	I in mA	$I \cdot t$ in mAs	Feldgröße in cm x cm	$H_p(10)$ in μ Sv
Pferd, Rücken*	94	30	10	ca. 33 x 40	1,7
Pferd, Knie	70	40	4	ca. 22 x 28	1,7
Pferd, Sprunggelenk	70	40	5	ca. 22 x 28**	0,4
Pferd, Zehe	58	50	4	ca. 22 x 28**	0,2 bis 1

* Rückenaufnahmen sind bei Pferden kompliziert und werden fast ausschließlich nur in Kliniken durchgeführt. Die Röntgenplatte wird dabei an einem Stativ befestigt, so dass nur eine helfende Person am Kopf des Pferdes zur Beruhigung eingesetzt wird. Deren Abstand zur untersuchten Körperregion beträgt fast 2 m und der Tierkörper dient zusätzlich als Abschirmung.

** Die angegebene Feldgröße (am Röntgenfilm gemessen) ist teilweise größer als das zu untersuchende Körperteil.

Bei Untersuchungen von Pferdebeinen ist die Feldgröße teilweise größer als das zu untersuchende Körperteil. Die Streustrahlung entsteht jedoch i.A. nur am Körperteil, es sei denn, das Röntgengerät ist nicht optimal ausgerichtet und die direkte Strahlung trifft auch auf andere Objekte, wie z.B. den Fußboden. Dies ist sicherlich der Grund für den gefundenen großen Bereich der Dosiswerte bei den Aufnahmen der Pferde-Zehe in Tabelle 2.

Bei etwa der Hälfte der Untersuchungen an Tieren sind helfende Personen anwesend. Bei kranken Kleintieren werden im Jahr ca. 3 Aufnahmen pro Tier angefertigt. Bei Großtieren (Pferde) sind es pro Pferd ca. 6 Aufnahmen. Bei einer Ankaufuntersuchung beim Pferd werden bei verschiedenen Aufnahme-Situationen (Röntgen der Hufe, Knie, Sprunggelenke etc.) ca. 20 Aufnahmen pro Tier gemacht. Im Mittel kann eine Dosis für die anwesende helfende Person pro Ankaufuntersuchung auf weniger als 13 μ Sv abgeschätzt werden [4]. Vergleichbare Ergebnisse sind in den Dissertationen von Koert [5] und Niehaus [6] zu finden.

3.3.2 Bereich Human- und Zahnmedizin

Helfende Personen kommen im Bereich der Humanmedizin hauptsächlich in der Orthopädie vor. Von bundesweit jährlich etwa 136 Mio. Röntgenuntersuchungen entfallen ca. 100 Mio. auf die Orthopädie. Dabei sind bei ca. 2 % der Untersuchungen (d.h. ca. 2 Mio.) helfende Personen anwesend. Hierbei sind Becken- und Fuß-

Aufnahmen die häufigsten Untersuchungen. Bei Becken-Untersuchungen werden in ca. 80 % der Fälle 2 Aufnahmen angefertigt.

Es werden jährlich ca. 60 Mio. zahnmedizinische Röntgenaufnahmen durchgeführt, hier sind jedoch sehr selten helfende Personen anwesend.

Die für verschiedene Aufnahmesituationen gemessenen Dosiswerte für den Bereich Orthopädie sind in Tabelle 3 und die für den Bereich Zahnmedizin in Tabelle 4 aufgelistet. Die Werte stimmen gut mit den in [8] angegebenen Werten überein.

Tabelle 3: Dosis helfender Personen bei typischen Untersuchungen im Bereich Humanmedizin (Orthopädie) mit den zugehörigen Parametern. Die mit den EPD Mk2-Dosimetern oberhalb der Schutzkleidung gemessenen Dosiswerte beziehen sich jeweils auf eine Aufnahme (siehe Kapitel 2).

Untersuchung	U_{HV} in kV	$I \cdot t$ in mAs	DAP* in cGycm ²	Feldgröße in cm x cm	$H_p(10)$ in μ Sv
Kind, Hand	46	1,77	0,6	17 x 23	0,1
Baby, Wirbelsäule	57	46	10	k.A.	1
Kind, Wirbelsäule (LWS)	75 bis 90	14 bis 44	7 bis 23	k.A.	2 bis 5
Kleinkind, Becken	66	1,4	1,39	18 x 20	0,2
Kind, Becken	75	7	14	24 x 30	0,1 bis 3
Erwachsener, Becken	75	10 bis 15	70	24 x 30	7

* DAP = Dosisflächenprodukt

Tabelle 4: Dosiswerte helfender Personen bei typischen zahnmedizinischen Röntgenuntersuchungen mit den zugehörigen Parametern. Die mit den EPD Mk2-Dosimetern oberhalb der Schutzkleidung gemessenen Dosiswerte beziehen sich jeweils auf eine Aufnahme (siehe Kapitel 2).

Untersuchung	U_{HV} in kV	I in mA	$I \cdot t$ in mAs	$H_p(10)$ in μ Sv
Fernröntgen-Seitenbild	77	14	4,5	0,1
Intraorale Einzelzahnaufnahme	70	7	0,8	0,2
Panorama (OPT)	62	10	k.A. [#]	0,3
Digitale Volumen-Tomographie (DVT)*	110	2,3	k.A. [#]	5

* Bei der DVT sind keine helfenden Personen anwesend.

[#] Die Angabe des mAs-Produktes für OPT und DVT ist nicht sinnvoll, da aufgrund des bewegten Strahls die gesamte Fläche zeitlich nicht komplett ausgeleuchtet ist.

3.3.3 Unsicherheitsbetrachtung

Die in den Tabellen 2 bis 4 angegebenen Dosiswerte haben eine relative erweiterte Unsicherheit ($k=2$) von 50 %. Diese ergibt sich aus folgenden Einzel-Unsicherheiten: Der Abstand der helfenden Personen bei Röntgenuntersuchungen von Pferden betrug ca. 0,8 m. Im Bereich der Human- und Zahnmedizin betrug der Abstand der helfenden Personen ca. 0,6 m bis 0,8 m. Der Unsicherheitsbeitrag aufgrund des Abstandes zum Streukörper liegt bei 25 %. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass sich

die helfende Person je nach momentaner Situation etwas anders positionieren muss und damit kein fester Abstand eingehalten werden kann. Der Unsicherheitsbeitrag durch unterschiedliche Rückstreukörper beträgt ca. 2 %, die ungenaue Ausrichtung der Dosimeter (Winkelabhängigkeit des Ansprechvermögens) wurde zu 5 % abgeschätzt. Die Unsicherheit bei der Kalibrierung liefert ca. 3 %. Der Variationskoeffizient trägt mit ca. 2 % zur Gesamtunsicherheit bei.

Da für die Untersuchungen im Bereich "Kleintiere" Tierphantome und für vergleichende Messungen eine tote Katze bzw. ein sedierter Hund eingesetzt wurden, konnten die Dosimeter in einem fest definierten Abstand von 0,5 m aufgestellt werden. Die Unsicherheit des Messabstandes beträgt daher nur 1 %. Als Rückstreukörper wurden PMMA-Phantome verwendet, so dass ein Beitrag zur Gesamtunsicherheit aufgrund unterschiedliche Rückstreukörper entfällt. Bei diesen Messungen unter Laborbedingungen entfällt ebenso ein Beitrag aufgrund einer ungenauen Ausrichtung der Dosimeter. Die Gesamtunsicherheit der in Tabelle 1 aufgelisteten Dosiswerte ergibt sich zu 8 %.

Zu beachten ist jedoch, dass sich in der Praxis die realen helfenden Personen bewegen und damit der Abstand zum Streukörper stark variiert. D.h. bei realen Untersuchungsszenarien von Kleintieren ergibt sich ein wesentlich größerer Unsicherheitsbeitrag durch den Abstand. Die Gesamtunsicherheit der in Tabelle 1 angegebenen Dosiswerte ist daher bei "Nicht-Laborbedingungen" deutlich höher.

3.4 Diskussion

Helfende Personen sind hauptsächlich bei Untersuchungen in der Tierheilkunde und der Orthopädie erforderlich. Bei dosisintensiven Untersuchungsverfahren, wie z.B. CT und Angiographie, sind helfende Personen nicht anwesend. Die angegebenen Dosiswerte für helfende Personen sind oberhalb der Bleischürze gemessen (siehe Kapitel 2).

Der höchste Dosiswert von ca. 30 μSv trat bei Halteleistungen im Bereich Tiermedizin / Kleintiere (Hund) auf, da hier der Abstand der helfenden Person zum Tier und damit zur Streustrahlungsquelle am kleinsten und die Strahlungsfeldgröße am größten ist.

Die ermittelten Dosiswerte sind in der Größenordnung der natürlichen Umgebungsstrahlung von ca. 12 Stunden bis ca. 300 Stunden (12 Tage). Die Tagesdosis durch die natürliche Umgebungsstrahlung liegt bei ca. 2,5 μSv .

Diese geringen Dosiswerte gelten, wenn sich die helfende Person nur im Streustrahlungsfeld aufhält. Nicht in die Untersuchungen einbezogen wurden evtl. Unfallsituationen, d.h. die Person kommt in den Nutzstrahl. Um die Personen bei solchen Unfällen zu schützen, sind die vorgeschriebenen Strahlenschutzvorkehrungen, z.B. Tragen von Bleischürzen, zu beachten. Etwaige Teilkörperexpositionen, wie sie z.B. durch unerlaubte Halteleistungen im Nutzstrahlungsbereich vorkommen könnten, werden ebenfalls als Unfallsituation eingestuft. Bei einer Unfallsituation wäre für eine helfende Person mit entsprechend höheren Dosiswerten zu rechnen.

4. Teilbereich 2: „Dosisermittlung bei Grenzkontrollen mit ionisierender Strahlung“

4.1 Motivation

Durchleuchtungseinrichtungen mit Röntgenstrahlung, sog. Röntgenscanner, werden zum Durchleuchten (Transmission) oder zum "Abtasten" der Oberfläche (Rückstreuung) bei der Personen- und Fahrzeugkontrolle eingesetzt. Für die vom Gesetzgeber zu treffende Entscheidung, ob ein Einsatz von Röntgenscannern zur Personenkontrolle in Deutschland gerechtfertigt ist, ist eine Einschätzung der möglichen Gefährdung durch die verwendete ionisierende Strahlung notwendig. Hierfür sollte im Rahmen des Vorhabens eine entsprechende Datenbasis mit Personen- und Ortsdosen bei solchen Anlagen erarbeitet werden.

4.2. Funktionsprinzip von Röntgenscannern

Zunächst wurde eine intensive Recherche der kommerziell erhältlichen Röntgenscanner für die Fahrzeug- und Personenkontrolle durchgeführt und Kontakte zu Herstellern geknüpft. Die Spezifikationen und Charakteristika der Scanner wurden zusammengestellt. Eine ausführliche Beschreibung der zwei Scanner-Techniken ist in [3] und [7] nachzulesen und soll im Folgenden nur kurz dargestellt werden.

Bei den kommerziell verfügbaren Geräten zur Kontrolle von Personen und Fahrzeugen mit Röntgenstrahlung werden zwei Mess-Verfahren angewendet: das Transmissions- und das Rückstreu-Verfahren.

Die Transmissions-Röntgenscanner arbeiten ähnlich den Systemen der diagnostischen Radiologie: das zu untersuchende Objekt wird durchleuchtet, wobei die transmittierte Strahlung vom Detektor gemessen wird. Bei dieser Art von Scannern wird ein kontinuierlicher Röntgenstrahl durch speziell angeordnete Kollimatoren zu einem vertikalen, fächerartigen Strahl von wenigen Millimetern Breite geformt. Die vertikale Ausdehnung des Strahls wird durch entsprechende Kollimierung der Höhe des zu scannenden Objektes angepasst. Das zu untersuchende Objekt wird entweder auf einem Transportband gleichmäßig vor der Detektorelement-Zeile durch diesen fächerartigen Röntgenstrahl bewegt oder fährt selbst durch den Fächerstrahl (Fahrzeuge). Die Ortsauflösung des erzeugten Bildes ist durch die Abmessungen der einzelnen Detektorelemente bestimmt und liegt typischerweise bei ca. 2 mm x 2 mm.

Bei den Rückstreu-Röntgenscannern wird die von der Röhre kontinuierlich emittierte Röntgenstrahlung durch einen rotierenden Kollimator zu einem nadelartigen Strahl geformt. Der Focus der Röntgenröhre befindet sich auf der Drehachse des Kollimators. Der Kollimator ist eine sich drehende Scheibe mit Strahldurchlässen. Diese rotierende Bewegung bewirkt eine der beiden zum Scannen notwendigen Bewegungsrichtungen des Strahls über das Objekt. Die zweite Bewegung wird entweder durch Bewegen des Objektes auf einem Transportband, wie in Abbildung 13 schematisch dargestellt, oder durch Bewegen der Röhre (inkl. Kollimator) realisiert. Großflächige Detektoren, die sich zwischen Röhre und Objekt befinden, weisen die aus dem jeweils bestrahlten Objektpunkt durch den Compton-Effekt rückgestreuten Photonen

nach. Die Ortsauflösung ist durch die Abmessungen des Röntgenpunktes auf der Objektoberfläche gegeben.

Sowohl beim Transmissions- als auch beim Rückstreu-Scanner dauert ein Scan-Vorgang ohne Bildauswertung jeweils ca. 10 s. Ein System, bei dem das Transmissions- und Rückstreu-Verfahren (T&R) kombiniert wurde, ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt.

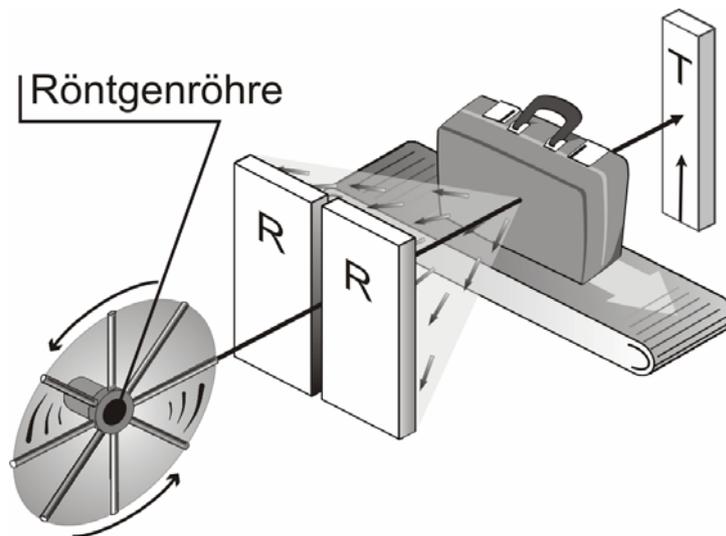


Abbildung 13: Scanner-System basierend auf der Kombination aus Transmissions- und Rückstreu-Technik. Der kontinuierliche Röntgenstrahl wird durch einen rotierenden Kollimator zu einem nadelartigen Strahl geformt. Die transmittierten Photonen werden hinter dem Objekt im Detektor (T) nachgewiesen, die aus dem bestrahlten Objektpunkt rückgestreuten Compton-Photonen werden in den sich zwischen dem Objekt und der Röntgenröhre befindlichen großflächigen Detektoren (R) registriert. Jeder Bildpunkt ist dabei durch die Kollimator- und Transportband-Position definiert.

4.3 Messungen

Die Messbedingungen bei den sich im Einsatz befindlichen Transmissions- und Rückstreu-Röntgenscanner sind ähnlich: aus Sicht des Objektes befindet es sich in einem gepulsten Photonen-Strahlungsfeld.

Die messtechnische Schwierigkeit bestand darin, dass direkt im Nutzstrahl gemessen werden musste, d.h. bei einer relativ hohen Dosisleistung in Kombination mit sehr kurzen Bestrahlzeiten. Die zu erwartenden Dosiswerte liegen in der Größenordnung der natürlichen Strahlung weniger Minuten. Da bisher kein direkt anzeigendes, bauartgeprüftes Dosimeter diese Messaufgabe zuverlässig erfüllt, wurde in der PTB ein entsprechendes Messsystem, basierend auf Sekundärnormalionisationskammern und einer speziellen Messelektronik, entwickelt (siehe Kapitel 2). Ionisationskammern sind dabei aufgrund ihres linearen Zusammenhangs zwischen Dosis und gemessener Ladung und ihrer geringen Dosisleistungsabhängigkeit bei der Dosismessung sehr gut geeignet. Mit diesem Messsystem ist es möglich, die von einer Ionisationskammer erzeugte Ladung in Zeitintervallen von ca. 70 ms auszulesen.

Ein typischer Zeitverlauf der Ladung während eines Scan-Vorgangs ist in Abbildung 14 dargestellt. Für diese Messung war die $H^*(10)$ -Ionisationskammer (HS01) in einem Fahrzeug installiert. Sobald der Röntgenstrahl das zu scannende Fahrzeug trifft, registriert die Kammer Streustrahlung. Die eigentliche Ausleuchtung der Kammer durch den Nutzstrahl erfolgt lediglich für ca. 1,8 s; innerhalb dieser Zeit steigt die Ladung sprunghaft an. Der durch die Streustrahlung erzeugte Anteil der Ladung und somit der Dosis liegt bei dieser Messung bei ca. 20 %. Zur Bestimmung der durch den Scan-Vorgang erzeugten Ladung wird kurz vor bzw. kurz nach dem durch die Bestrahlung erzeugten „Ladungssprung“ der Ladungs-Zeit-Verlauf linear angepasst. Die durch den Scan-Vorgang erzeugte Ladung ergibt sich damit als Differenz zwischen diesen beiden linear extrapolierten Verläufen. Die Auswertung dieser zeitaufgelösten Messungen ist detailliert in [3] und [7] beschrieben.

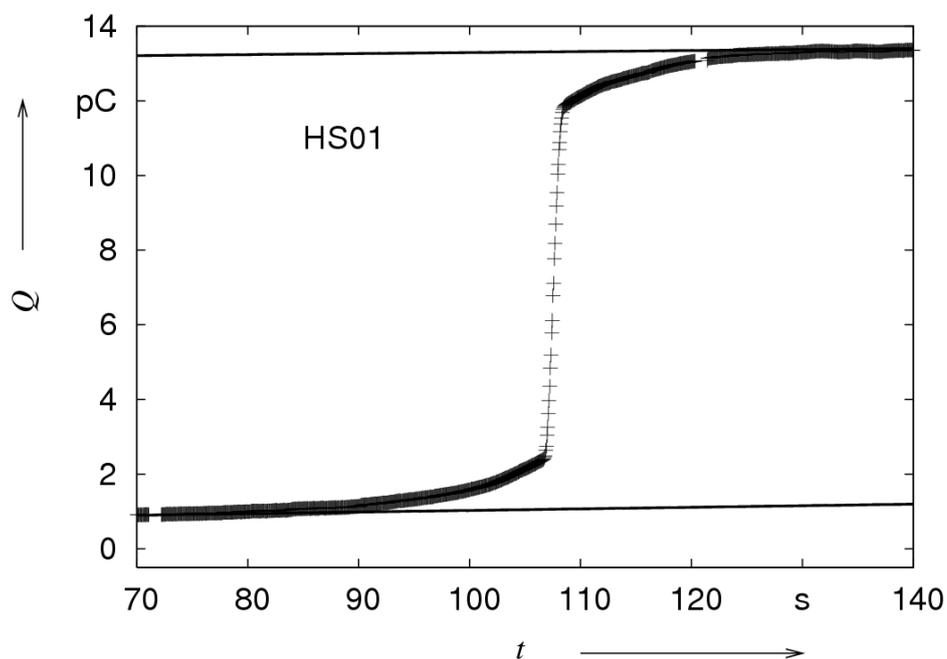


Abbildung 14: Zeitlicher Ladungsverlauf, gemessen mit der $H^*(10)$ -Sekundärnormalionisationskammer (HS01) an einem Fahrzeugscanner.

Die Dosis pro Scan hängt von der Mess-Position (Abstand und Höhe bzgl. der Röntgenröhre) ab. Es wurde im typischen Abstand einer Person zur Röntgenröhre bei verschiedenen Höhen gemessen. Bei jedem Scanner wurden mit den typischerweise eingestellten Betriebsparametern (Hochspannung, Strom, Filterung usw.) mehrere Messungen bei mindestens fünf verschiedenen Messaufbauten durchgeführt. Daraus wurde dann die in Tabelle 5 angegebene maximale Dosis-Mittelwert pro Scan bestimmt.

4.4 Messergebnisse

In der Tabelle 5 sind die an sieben typischen, kommerziell erhältlichen Röntgenscannern ermittelten maximalen Dosis-Mittelwerte zusammen mit den eingestellten Betriebsparametern angegeben. Es handelt sich dabei um ein zur Fahrzeug-Kontrolle eingesetztes kombiniertes System (T&R), drei Transmissions-Personnenscanner (T) und ein Rückstreu-Personnenscanner (R). Bei den beiden Transmissions-Fahrzeugscannern mit Elektronenbeschleunigern handelt es sich um ein mobiles System und um die ortsfeste Container-Prüfanlage im Hamburger Hafen.

Tabelle 5: Zusammenstellung der an typischen, kommerziell erhältlichen Röntgenscannern gemessenen maximalen Dosis-Mittelwerte und den eingestellten Betriebsparametern. T: Transmissions-Verfahren, R: Rückstreu-Verfahren

Typ	Scan-Objekt	Röhrenspannung in kV	Röhrenstrom in mA	$H_p(10)$ je Scan in μSv	$H^*(10)$ je Scan in μSv
T&R	Fahrzeug	450	6,5	-- [#]	0,4
T	Person	160	3,7	5	4,5
T	Person	140	0,65 0,18	6 -- [#]	6 1,5
T	Person	220	1,0	3,6	3,2
R	Person	50	5	-- [#]	0,07
Mobiler Fahrzeugscanner mit Beschleuniger:					
T	Fahrzeug	2 MV-Beschleuniger		-- [#]	< 1
Container-Prüfanlage in Hamburg:					
T	Fahrzeug	2 X 10 MV-Beschleuniger		55	51

[#] Die auftretenden Dosiswerte waren zu gering, um sie mit der $H_p(10)$ -Kammer verlässlich messen zu können.

Die Container-Prüfanlage in Hamburg stellt als stationäre Anlage mit zwei 10 MV-Linearbeschleunigern ein Sonderfall dar. Bei diesem System wird der LKW auf einem Schlitten durch den Scanner gezogen. Die Dosis ist deutlich höher als bei den mobilen Systemen. Seit der Inbetriebnahme im Jahr 1996 ist bisher ein Fall einer versehentlichen Personen-Bestrahlung (schlafender Beifahrer) bekannt.

Die Gesamt-Unsicherheit für die in Tabelle 5 angegebenen Dosiswerte beträgt 10 % ($k=2$). Eine detaillierte Diskussion der Unsicherheit ist in [3] zu finden. Bei den Transmissionsystemen ist die verwendete Röhrenspannung für die Personenkontrolle deutlich niedriger als die bei der Fahrzeugkontrolle, was in der geringeren zu durchstrahlenden Masse begründet ist.

Es ist zu beachten, dass bei den Rückstreu-Röntgenscannern lediglich die dem Scanner zugewandte Seite des Objektes sichtbar ist. Für eine vollständige Untersuchung sind daher zwei bis drei Scans notwendig. Entsprechend ist die Gesamtdosis eines Untersuchungsvorgangs höher als die angegebene Dosis für einen Einzel-Scan. Die bisher bei den Rückstreu-Scannern angestrebte Ortsauflösung ist wesentlich geringer als die bei den Transmissions-Scannern, so dass sich geringere Dosiswerte ergeben.

Bei allen untersuchten Systemen tritt eine vergleichsweise geringe Dosis pro Scan-Vorgang auf. Sie liegt in der Größenordnung der Tagesdosis durch die natürliche Umgebungsstrahlung von ca. 2,5 μSv , oder – verglichen mit der natürlichen Strahlung beim Fliegen – sie entspricht etwa 10 % der Flugdosis von etwa 35 μSv , die eine Person auf einem Flug von Frankfurt nach Washington (Dauer ca. 8 h) erhält.

4.5 Anmerkungen

Ziel des Vorhabens war es, rückführbare Dosiswerte in den aktuellen Strahlenschutz-Messgrößen Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$, und Umgebungs-Äquivalentdosis, $H^*(10)$, bei kommerziellen, repräsentativen Röntgenscanner-Systemen für die Personen- und Fahrzeugkontrolle zu ermitteln. Je nach Untersuchungszweck wird durch die Software und/oder die Hardware des Systems sowohl die Bildqualität als auch die Bildauflösung fest vorgegeben. Eine Beurteilung der Scanner hinsichtlich dieser Punkte war nicht Gegenstand des Vorhabens. Gemessen wurde bei den üblicherweise im Routinebetrieb eingestellten Betriebsparametern. Ferner ist die Frage der Rechtfertigung des Einsatzes von Röntgenstrahlung zur Personenkontrolle von anderer Seite zu beantworten.

Die durchgeführten Messungen liefern eine Momentaufnahme der verwendeten Röntgenscanner. Aufgrund der sich ständig verändernden Anforderungen, wie z.B. höhere Bildauflösung bedingt durch trickreichere Drogenverstecke, und dem Fortschreiten der Technik werden die Systeme ständig weiterentwickelt.

International arbeitet die PTB an der Erstellung der IEC Norm 62463 „Radiation protection instrumentation – X-ray systems for the screening of persons for security and the carrying of illicit items“ mit. In dieser Norm werden die Mindest-Anforderungen bezüglich des Strahlenschutzes bei solchen Systemen festgelegt. Zur Überprüfung dieser Anforderungen wird in der IEC Norm das von der PTB entwickelte Messverfahren empfohlen.

5. Erfolgskontrollbericht

5.1. Zusammenfassung und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die Ermittlung der Körperdosis ist gemäß Strahlenschutz- und Röntgenverordnung für Personen erforderlich, die sich in Kontrollbereichen aufhalten. Zu diesem Personenkreis gehören neben den beruflich strahlenexponierten Personen die helfenden Personen in der Human-, Zahn- und Tiermedizin. Ziel des Vorhabens war es u.a., bei typischen Bestrahlungsszenarien bei helfenden Personen rückführbare Dosiswerte in der Messgröße Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$, zu ermitteln. Diese Daten sollen als Grundlage für die Entscheidung dienen, ob und wenn ja wie die helfenden Personen in die Strahlenschutzüberwachung einbezogen werden. D.h. ob die Personendosis jeweils pauschal durch Berechnung ermittelt werden soll, ob Dosimeter zu tragen sind oder aber ob auf eine Dosisermittlung verzichtet werden kann. Die im Rahmen des Vorhabens bestimmten Dosiswerte sind in den Tabellen 1 bis 4 aufgelistet und im Kapitel 3.3 erläutert.

Die im direkten Strahl bestimmten rückführbaren Orts- und Personendosen in den Messgrößen Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$, und Umgebungs-Äquivalentdosis, $H^*(10)$, bei verschiedenen Röntgenscannern zur Personenkontrolle sollen als Grundlage für die Entscheidung dienen, ob in Zukunft solche Geräte an Flughäfen, Seehäfen oder Grenzen eingesetzt werden sollen. Die Ergebnisse für diesen Teilbereich des Vorhabens sind in der Tabelle 5 zusammengestellt und im Kapitel 4.4 eingehend erläutert.

Das Vorhaben 3604S04434 wurde in 3 Themengruppen untergliedert (siehe Verwaltungsvereinbarung vom 16.07.2004): "Exposition von helfenden Personen bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der Human- und Zahnmedizin" und "Exposition von helfenden Personen bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der Tiermedizin", beide gehören zum Teilbereich eins, und "Einsatz von Röntgenstrahlung in Durchleuchtungseinrichtungen bei Grenzkontrollen", das ist der Teilbereich zwei. Bei allen drei Themengebieten wird gepulste Photonen-Strahlung eingesetzt, so dass die Messbedingungen sehr ähnlich sind. In der Themengruppe "Durchleuchtungseinrichtungen" musste im primären gepulsten Strahlungsfeld gemessen werden, wohingegen bei den helfenden Personen im Streustrahlungsfeld zu messen war. Für die Ermittlung der Orts- und Personendosen wurden sowohl kommerzielle elektronische Strahlenschutzdosimeter verwendet als auch zwei Ionisationskammern mit spezieller Messelektronik (siehe Kapitel 2). Bei den Messungen zeigte sich, dass die Strahlenschutzdosimeter im direkten Strahlungsfeld keine oder nur bedingt verlässliche Messwerte lieferten. Die Dosis wurde bei diesen Bestrahlungssituationen mit Ionisationskammern ermittelt. Für Messungen im Streustrahlungsfeld, in dem die Dosisleistung deutlich niedriger ist, konnten Strahlenschutzdosimeter hingegen eingesetzt werden.

Als Fazit ergibt sich aus diesen Erfahrungen, dass elektronische Dosimeter für die Strahlenschutzüberwachung an Arbeitsplätzen mit gepulster Photonen-Strahlung nur bedingt verwendbar sind. Das gleiche gilt für Messungen im Rahmen von Gutachter-tätigkeiten an gepulsten Röntgenanlagen.

5.2 Ausblick

Der Einsatz von gepulster Röntgenstrahlung ist weit verbreitet, u.a. in der medizinischen Diagnostik und Therapie, in der Fertigungskontrolle und zur industriellen Qualitätssicherung. Wie oben erläutert, messen die kommerziell erhältlichen elektronischen Dosimeter in diesen Feldern nicht verlässlich. Direkt anzeigende Dosimeter werden aber u.a. benötigt für Gutachtertätigkeiten, Abgrenzung von Strahlenschutzbereichen oder zur Überwachung von Schwangeren. Es besteht daher zur Sicherstellung des Strahlenschutzes dringender Bedarf, für diese Felder geeignete direkt anzeigende Dosimeter zu haben. Eine entsprechende Neu-Entwicklung ist erforderlich.

5.3 Kosten- und Zeitplanung des Vorhabens

Die Gesamtkosten des Vorhabens beliefen sich auf 541.614,84 €. Etwa die Hälfte der Kosten (272.566 €) wurden als Eigenbeteiligung von allen Vorhabenspartnern aufgebracht, der Rest in Höhe von 269.048,84 € wurde vom Auftraggeber finanziert. Die in der Verwaltungsvereinbarung vom 08.07.2004 festgelegten Gesamtkosten wurden nicht überschritten; es ergab sich ein Überschuss in Höhe von 7198,16 €.

Der in der Verwaltungsvereinbarung festgelegte Zeitplan wurde auf Wunsch des BMU bzw. des A4-Ausschusses der SSK und mit Zustimmung des Auftraggebers kurz nach Vorhabensbeginn umgestellt. Der Teilbereich "Durchleuchtungseinrichtungen" wurde vorrangig bearbeitet und erst anschließend der Teilbereich "Helfende Personen in der Human-, Zahn- und Tiermedizin". Da jedoch in allen Bereichen Messungen vor Ort – entweder beim Hersteller oder in verschiedenen Kliniken – durchgeführt werden mussten, waren umfangreiche Terminabsprachen erforderlich. Dies hatte zur Konsequenz, dass sich erstens Messmöglichkeiten erst zu einem späteren Zeitpunkt ergaben als geplant und zweitens die Themenbereiche teilweise parallel bearbeitet werden mussten. Um auch Messungen an während der Vorhabenslaufzeit neu entwickelten Durchleuchtungseinrichtungen zur Personen- und Fahrzeugkontrolle im Rahmen des Vorhabens durchzuführen und die Untersuchungen im Bereich "helfende Personen" abschließen zu können, wurde das Vorhaben mit Zustimmung des Auftraggebers um 6 Monate verlängert. Die Laufzeit des Vorhabens betrug damit insgesamt 3 Jahre (01.10.2004 bis 30.09.2007).

6. Literaturverzeichnis

- [1] Ankerhold, U.: Optimisation of a secondary standard chamber for the measurement of the ambient dose equivalent, $H^*(10)$, for low photon energies. Radiat. Prot. Dosim. 118, 16-21 (2006)
- [2] Ankerhold, U., Behrens, R., Ambrosi, P.: A Prototype ionisation chamber as a secondary standard for the measurement of personal dose equivalent, $H_p(10)$, on a slab phantom, Radiat. Prot. Dosim. 86(3), 176-173 (1999)
- [3] Hupe, O.; Ankerhold, U.: Determination of ambient and personal dose equivalent for personnel and cargo security screening, Radiat. Prot. Dosim., 121(4), 429-437 (2006)
- [4] Hupe, O. und Ankerhold, U.: Dose to persons assisting voluntarily during X-ray examinations of large animals
Radiat. Prot. Dosim. doi:10.1093/rpd/mccm422 (2007)
- [5] Koert, A.: Dosimetrische Untersuchungen an dem digitalen Röntgendiagnostiksystem "Philips bucky Diagnost PCR AC-500". Ein Beitrag zur Bewertung der Strahlenbelastung des Untersuchungspersonals bei der Untersuchung von Kleintieren. Dissertation Universität Leipzig (2004)
- [6] Niehaus, H.: Untersuchung zur Strahlenexposition von Tierbetreuungsperson und Haltepersonal bei der Radiographie von Hund und Katze, Dissertation Tierärztliche Hochschule Hannover (2006)
- [7] Hupe, O.: Personenkontrollen mittels Röntgenstrahlung, Strahlenschutzpraxis Heft 04, 53-57 (2006)
- [8] Jansen, J. Th. M., Zoetelief, J.: Dose constraints and guidance for exposure of individuals knowingly and willingly helping in the support and comfort of individuals undergoing medical exposure,
Radiat. Prot. Dosim. 118(3), 315-324 (2006)

7. Im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 erstellte Veröffentlichungen und Präsentationen

Liste der Veröffentlichungen

- 1) O. Hupe und U. Ankerhold
Determination of ambient and personal dose equivalent for personnel and cargo security screening
Radiation Protection Dosimetry, Vol. 121, No. 4, 429-437, (2006)
- 2) O. Hupe
Personenkontrolle mittels Röntgenstrahlung
Strahlenschutzpraxis, 4, 53-57, (2006)
- 3) O. Hupe
Anwendung ionisierender Strahlung – Röntgenscanner, PTB-Mitteilungen, 116, Heft 4, 390-392, (2006)
- 4) O. Hupe und U. Ankerhold
X-ray security scanners for personnel and vehicle control – Dose quantities and dose values
European Journal of Radiology, 63 (2), 237-241 (2007)
- 5) O. Hupe und U. Ankerhold
Dose to persons assisting voluntarily during X-ray examinations of large animals
Radiat. Prot. Dosim. doi:10.1093/rpd/mccm422 (2007)

Liste der Konferenzbeiträge

2005

- 1) O. Hupe und U. Ankerhold
Einsatz von Röntgenstrahlung für Personen- und Güter-Kontrolle
62. Treffen des Arbeitskreises „Dosimetrie externer Strahlung“, Heidelberg 28.-29. April 2005

2006

- 2) O. Hupe und U. Ankerhold
Using ionising radiation against terrorism and smuggling: Determination of the occurring dose values
Second European International Radiation Protection Association (IRPA) Tagung, Paris, Frankreich, Mai 2006
- 3) U. Ankerhold, O. Hupe und G. Buchholz
Using ionising radiation against terrorism and smuggling: Dosimetric problems
Second European International Radiation Protection Association (IRPA) Tagung Paris, Frankreich, Mai 2006

- 4) O. Hupe
X-ray security screening – occurring dose values
15. Council on Ionizing Radiation Measurements and Standards (CIRMS) at
NIST, Gaithersburg, MD, USA, Oktober 2006

Sonstige Vorträge und Veröffentlichungen

2005

- 1) J. Böhm, O. Hupe und U. Ankerhold
Einsatz von Röntgenstrahlung für Personen- und Güterkontrollen - Erste Ergebnisse im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 -, 107. Sitzung des SSK-A4, Bonn, 23.-24. Februar 2005
- 2) J. Böhm, O. Hupe und U. Ankerhold
Einsatz von Röntgenstrahlung für Personen- und Güterkontrollen - Erste Ergebnisse im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 -, 199. Sitzung der SSK, Bonn, 21.-22. April 2005

2006

- 3) H. Kreienfeld, O. Hupe und U. Ankerhold
Dosisermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der medizinischen Heilkunde, zahnmedizinischen Heilkunde, Tierheilkunde – Statusbericht im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 -, SSK-A4, Bonn, 21.-22. Februar 2006
- 5) O. Hupe, U. Ankerhold, H. Kreienfeld
Einsatz von Röntgenstrahlung für Personen- und Güterkontrollen
Expertentreffen beim TÜV NORD, Hannover, 20. April 2006
- 6) U. Ankerhold, O. Hupe, H. Kreienfeld
Dosisermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der medizinischen Heilkunde, zahnmedizinischen Heilkunde, Tierheilkunde - Statusbericht im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 -. 55. Sitzung des Länderausschusses Röntgenverordnung, Münster, 11. Mai 2006
- 7) O. Hupe
Einsatz von Röntgenstrahlung gegen Terror und Schmuggel
PTB/BfS- Kolloquium, PTB Braunschweig, 04. Juli 2006
- 8) O. Hupe, U. Ankerhold und H. Kreienfeld
Dosisermittlung bei Grenzkontrollen mit ionisierender Strahlung – Statusbericht im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 -. 114. Sitzung SSK-A4, Bonn, 12. Dezember 2006
- 9) O. Hupe, U. Ankerhold und H. Kreienfeld
Dosisermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der Tierheilkunde - Statusbericht im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 -. 114. Sitzung SSK-A4, Bonn, 12. Dezember 2006

2007

- 10) O. Hupe
Strahlenschutzdosimeter und gepulste Strahlungsfelder
66. Treffen des Arbeitskreises „Dosimetrie externer Strahlung“, GSF Neuherberg
13. März 2007
- 11) O. Hupe, U. Ankerhold und H. Kreienfeld
Dosisermittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der Tierheilkunde
- Statusbericht im Rahmen des Vorhabens 3604S04434 - 131. Sitzung SSK-A2,
Bonn, 24. April 2007
- 12) O. Hupe
Kontrollen von Personen und Fahrzeugen mit Röntgenstrahlung - Wie hoch ist
die Dosis?, Jahrestagung des Kuratoriums der PTB, Braunschweig, 3. Mai 2007
- 13) O. Hupe
Kontrollen von Personen und Fahrzeugen mit Röntgenstrahlung - Wie hoch ist
die Dosis?, Evaluation der PTB durch den Wissenschaftsrat, Braunschweig,
26. September 2007

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz