

**Zur Quantifizierung der  
biologisch relevanten Strahlenexposition  
von Beschäftigten  
in der Radiologie und Kardiologie**

Vom Promotionsausschuss des Fachbereiches 11  
„Human-/Gesundheitswissenschaften“  
der Universität Bremen zur Erlangung  
des akademischen Grades Dr. Public Health  
genehmigte Dissertation

von

**Diplom-Physiker Jörn Lachmund**

März 2005

Betreuer:

Dr. H. von Boetticher, Klinikum Links der Weser, Bremen

Prof. Dr. W. Hoffmann, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Institut für Community Medicine

Gutachter:

Prof. Dr. W. Hoffmann, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Institut für Community Medicine

Prof. Dr. J. Bleck-Neuhaus, Universität Bremen, Fachbereich 01, Physik/Elektrotechnik

Tag des öffentlichen Kolloquiums: 20. Juli 2005

Berichte aus der Medizinischen Physik

**Jörn Lachmund**

**Zur Quantifizierung der biologisch  
relevanten Strahlenexposition von Beschäftigten  
in der Radiologie und Kardiologie**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2005

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4364-X

ISSN 1617-2965

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2002 bis 2005 im Bremer Institut für Präventionsforschung und Sozialmedizin (BIPS), Fachbereich 11 „Human- und Gesundheitswissenschaften“ der Universität Bremen und im Klinikum Links der Weser, Bremen.

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Hoffmann, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Institut für Community Medicine möchte ich für die Möglichkeit, diese Arbeit durchführen zu können, seinen vielen interessanten Anregungen, wegweisenden Literaturtipps, fördernden Diskussionen sowie seiner stets freundschaftlichen Betreuung danken. Mein Dank gebührt auch den Mitarbeitern dieses Institutes für ihre Unterstützung bei einigen schwierigen Literaturbeschaffungen.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Jörn Bleck-Neuhaus, Universität Bremen (Fachbereich 1, Physik/Elektrotechnik), der sich freundlicherweise als zweiter Gutachter zur Verfügung stellte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Heiner von Boetticher für die immer hilfsbereite Unterstützung bei den vielfältigen Messungen im Klinikum Links der Weser, Bremen sowie die unzähligen konstruktiven Diskussionen und Durchsprachen der Messergebnisse als auch Manuskripte zu dieser Arbeit. Den Ärzten, MTRA's und Krankenschwestern des Instituts für Radiologie (Prof. Dr. Günter Luska) und der Klinik für Kardiologie (Prof. Dr. Heinz-Jürgen Engel) im Klinikum Links der Weser, Bremen gilt mein Dank für die gute Kooperation bei der Bereitstellung der Untersuchungsräume sowie häufiger Unterstützung bei der Durchführung der Messungen.

Der überwiegende Anteil der Messungen erfolgte mit Hilfe zweier RANDO-Alderson-Phantome, die mir freundlicherweise von der Klinik für Strahlentherapie des Klinikums Bremen-Mitte und der Radiologisch-Onkologischen Klinik des Pius-Hospitals Oldenburg zur Verfügung gestellt wurden.

Unentbehrlich für mich war das Interesse sowie hohe Maß an Geduld und Rücksicht meiner lieben Frau Delia und meines Sohnes Delf, ohne das ein Entstehen dieser Arbeit undenkbar gewesen wäre; ihnen gebührt ein ganz besonderer herzlicher Dank.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>XI</b>
<b>Einheiten/Formelzeichen</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 Zusammenfassung / Summary</b> .....	<b>1</b>
1.1 Zusammenfassung .....	1
1.2 Summary .....	3
<b>2 Einleitung / Überblick</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Theoretische Grundlagen der Quantifizierung</b> .....	<b>7</b>
3.1 Strahlenbiologische Grundlagen und Gefährdung des Personals durch Röntgenstrahlen ..	7
3.1.1 Strahlenexposition des Menschen .....	7
3.1.2 Biologische Strahlenwirkungen .....	7
3.1.3 Zusammenhang zwischen Röhrenspannung und äquivalenter Energie der in der Röntgendiagnostik üblicherweise verwendeten weichen Röntgenstrahlung .....	10
3.1.4 Abschirmmaßnahmen gegen Strahlung .....	13
3.2 Dosisgrößen .....	15
3.2.1 Einführung .....	15
3.2.2 Definitionen .....	17
3.3 Richtlinien / Vorschriften .....	20
3.4 Konzept der effektiven Dosis, Anwendung im Strahlenschutz .....	22
<b>4 Messsystem</b> .....	<b>23</b>
4.1 Messaufbau, Messtechnik .....	23
4.1.1 Grundlagen der Thermolumineszenzdosimetrie: Kalibrierung, Energieabhängigkeit, Fading, Reproduzierbarkeit, Nachweisgrenze .....	23
4.1.2 Messmittel/Messverfahren .....	29
4.1.3 Weitere im Rahmen der Messungen benutzte Dosimeter .....	30
4.2 Phantom .....	34
4.2.1 Beschreibung des RANDO-Alderson-Phantom: Dichte, Zusammensetzung, Gewebeäquivalenz .....	34
4.2.2 Massenbestimmung des Phantoms Nr. 199 .....	36
4.2.3 Auswahl / Festlegung der Dosimeter-Messorte im RANDO-Alderson-Phantom .....	38
4.3 Auswerteverfahren - Erstellen einer nahezu standardisierten Auswertemaske .....	41
<b>5 Durchführung der Messungen und Messergebnisse</b> .....	<b>43</b>
5.1 Exposition des Personals an wichtigen Durchleuchtungsarbeitsplätzen .....	43
5.1.1 Allgemeine Charakteristika typischer Arbeitsplätze .....	44
5.1.2 Maßnahmen zur Dosisreduktion durch persönliche Schutzausrüstungen und Dauerschutzeinrichtungen .....	45
5.2 Erhebung von Messwerten mit dem Alderson-Phantom .....	49
5.2.1 Herzkatheterlabor (Kardiologie) .....	49
5.2.2 Angiographie (Radiologie) .....	53
5.2.3 Fernbediente Durchleuchtung .....	56
5.2.4 Nahbediente Durchleuchtung .....	59
5.3 Ermittlung der Ortsdosen .....	61
5.3.1 Kardiologie/Herzkatheterlabore .....	61
5.3.2 Angiographie .....	67
5.3.3 Fernbediente Durchleuchtung .....	69
5.3.4 Nahbediente Durchleuchtung .....	71

5.4	Ermittlung der Organdosen und effektiven Dosen .....	74
5.4.1	Kardiologie/Herzkatheterlabore .....	74
5.4.2	Angiographie (interventionelle Radiologie).....	81
5.4.3	Fernbediente Durchleuchtung .....	87
5.4.4	Nahbediente Durchleuchtung .....	92
5.5	Verfahren zur Ableitung der Organdosen aus der Umgebungs-Äquivalentdosis $H_x$ .....	97
5.5.1	Kardiologie/Herzkatheterlabore .....	97
5.5.2	Angiographie .....	98
5.5.3	Fernbediente Durchleuchtung .....	99
5.5.4	Nahbediente Durchleuchtung .....	100
<b>6</b>	<b>Vergleich der effektiven Dosen mit den Ergebnissen der amtlichen Personendosimetrie .....</b>	<b>101</b>
6.1	Vergleich der effektiven Dosis mit dem Messwert $H_p(10)$ für das Herzkatheterlabor ....	101
6.2	Vergleich der effektiven Dosis mit dem Messwert $H_p(10)$ für die Angiographie .....	103
6.3	Vergleich der effektiven Dosis mit dem Messwert $H_p(10)$ für die Fernbediente Durchleuchtung .....	105
6.4	Vergleich der effektiven Dosis mit dem Messwert $H_p(10)$ für die Nahbediente Durchleuchtung .....	107
6.5	Zusammenfassung und Bewertung .....	108
<b>7</b>	<b>Quantifizierung der Faktoren, um die Organdosen und effektive Dosen aufgrund der amtlichen Personendosimetrie unterschätzt werden .....</b>	<b>109</b>
7.1	Quantifizierung der Umrechnungsfaktoren für Organdosen relativ zur Personendosis ..	109
7.2	Quantifizierung der Korrekturfaktoren für die Effektiven Dosen .....	117
<b>8</b>	<b>Quantifizierung von Faktoren für geschlechtsspezifische effektive Dosen .....</b>	<b>119</b>
8.1	Berücksichtigung von Geschlechtsspezifischen Faktoren .....	119
8.2	Geschlechtsspezifische Bestimmung der effektiven Dosis: Modelle .....	119
8.3	Geschlechtsspezifische Korrekturfaktoren der effektiven Dosis für Patienten .....	122
8.4	Geschlechtsspezifische Korrekturfaktoren der effektiven Dosis für die Beschäftigten in der Radiologie und Kardiologie .....	123
<b>9</b>	<b>Entwicklung von verbesserten Methoden zur Bestimmung der effektiven Dosis .....</b>	<b>127</b>
9.1	1-Dosimeter-Konzept: Grundlagen .....	127
9.1.1	Einführung .....	127
9.1.2	Methodologien von publizierten 1-Dosimeter-Ansätzen .....	128
9.2	2-Dosimeter-Konzept: Grundlagen .....	137
9.2.1	Einführung .....	137
9.2.2	Methodologien von publizierten 2-Dosimeter-Ansätzen .....	138
9.3	Ableitung eigener Koeffizienten für das 2-Dosimeter-Verfahren .....	149
9.4	Mathematische Modellbildung zur Beschreibung des 2-Dosimeter-Konzeptes .....	154
9.5	Vergleich der unterschiedlichen Konzepte zur Personendosimetrie .....	161
9.5.1	Bewertung der publizierten 2-Dosimeter-Ansätze zur Berechnung der Effektivdosis ....	161
9.5.2	Zusammenfassung der wichtigsten Kritikpunkte an den publizierten 2-Dosimeter-Ansätzen zur Berechnung der Effektivdosis .....	163
9.5.3	Vergleich zwischen den publizierten und neu bestimmten 2-Dosimeter-Ansätzen .....	164
9.5.4	Relevanz des Schilddrüsenschutzes .....	167
9.6	Verfahren zur Abschätzung der effektiven Dosis aus den Organdosen .....	168
9.6.1	Kardiologie .....	168
9.6.2	Angiographie .....	169
9.6.3	Fernbediente Durchleuchtung .....	169
9.6.4	Nahbediente Durchleuchtung .....	170



**10 Quantitative Abschätzungen des Strahlenrisikos für das Personal in Radiologie und Kardiologie .....171**

10.1 Zusammenfassung der für die Quantifizierung benötigten Faktoren und Daten..... 171

10.1.1 Erklärung der Begriffe des absoluten, relativen und attributablen Risikos ..... 173

10.1.2 Bestimmung des Risikos aufgrund stochastischer Strahlenwirkungen ..... 175

10.1.3 Altersabhängigkeit..... 178

10.1.4 Krebslatenzzeiten..... 180

10.1.5 Bösartige und gutartige Tumorerkrankungen..... 182

10.1.6 Herleitung der für die Abschätzung verwendeten Risikofaktoren ..... 184

10.1.7 Alters- und Geschlechtsabhängigkeit für gutartige und bösartige Erkrankungen ..... 188

10.1.8 Vergleichsdaten für die „Nicht-Exponierte“ Gesamtbevölkerung der BRD ..... 192

10.1.9 Abschätzung der effektiven Dosen des Personals..... 193

10.2 Abschätzung des absoluten, relativen und zusätzlichen Risikos ..... 205

10.2.1 Zusätzliches Erkrankungsrisiko für das medizinische Personal..... 205

10.2.2 Absolutes und Relatives Mortalitätsrisiko für das medizinische Personal..... 216

10.2.3 Organspezifisches zusätzliches Mortalitätsrisiko für das medizinische Personal ..... 221

10.2.4 Relatives Mortalitätsrisiko für das medizinische Personal auf Grundlage der statistischen Analysen von Mancuso, Stewart und Kneale (MSK)..... 227

10.2.5 Mamma-Karzinom: Kumuliertes zusätzliches Mortalitätsrisiko für das weibliche medizinische Personal, Altersmodelle nach ICRP 60 und BEIR V ..... 233

10.3 Interpretation der korrigierten Strahlendosen in Bezug auf gesundheitliche Risiken beim Personal in der medizinischen Radiologie in Deutschland ..... 235

10.4 Unsicherheiten bei den Risiko-Abschätzungen..... 236

**11 Konsequenzen für den Strahlenschutz.....237**

**12 Literaturverzeichnis .....241**