

# **Fachverband für Strahlenschutz e.V.**

Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)  
für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz

**Publikationsreihe  
FORTSCHRITTE IM STRAHLENSCHUTZ**

**Publication Series  
PROGRESS IN RADIATION PROTECTION**



FS-91-55-T

ISSN 1013-4506

## **Strahlenschutz für Mensch und Umwelt**

25 Jahre Fachverband  
für Strahlenschutz

Band I

Jubiläumstagung

**Aachen, 30. September–3. Oktober 1991**

Bandherausgeber: H. Jacobs, H. Bonka

Verlag TÜV Rheinland

**BAND I****Plenarsitzungen****Rückblick, Stand, Ausblick**

1	Strahlenschutz in Deutschland - Gedanken und Erinnerungen K. Aurand	1
2	Die ersten 25 Jahre des Fachverbandes für Strahlenschutz W. Hunzinger	9
3	Radiation Protection as an International Profession J.R.A. Lakey	28
4	Strahlenwirkung auf Gen und Soma aus der Sicht der Strahlenbiologie und des Strahlenschutzes H. Fritz-Niggli	34
5	Krebsmortalität in Hiroshima und Nagasaki - Zur Neubewertung der Strahlenrisiken - A.M. Kellerer	47
6	Epidemiologische Untersuchungen nach natürlichen und beruflichen Strahlenexpositionen. - Ist das Risiko meßbar ? C. Streffer	63
7	Strahlenschutzkonzepte: Ein Vorbild für den Umweltschutz ? W. Jacobi	72
8	Die Vereinigung für Strahlenforschung und Strahlenschutz B. Dörschel, W. Kraus	84
9	Frühe Anwendung von Z = 92 (Uran) A. Brummeisl, G. Lieckfeld, P. Schöffl, A. Schöpf, R. J. Schwankner	85
10	Lebensmittelbestrahlung - nur ein psychologisches Problem ? H.J. Zehnder	96
11	Radioaktivitätsmessungen in der Sowjetunion - Das Meßprogramm des Bundesumweltministers R. Hille, H. Braun	108
12	ICRP-Empfehlungen: Gegenwart und Ausblick S. Prêtre	117
13	Strahlenschutz und europäischer Binnenmarkt H. Eriskat	118
14	Derzeitige Arbeitsschwerpunkte und zukünftige Aufgaben des Strahlenschutzes aus der Sicht des Bundesamtes für Strahlenschutz A. Kaul	127
15	Zukünftige Schwerpunkte des Fachverbandes für Strahlenschutz J. Narrog	143

## Sitzungen A 1 - A 5

### Strahlenschutz der Bevölkerung

#### Immissionsüberwachung

16	Der Arbeitskreis Umweltüberwachung im Fachverband für Strahlenschutz e.V. M. Winter	149
17	Die Chronik der Immissionsüberwachung mit Aerosolmeßgeräten E. Frenzel, W. Kiesewetter	156
18	Erfahrungen mit mobilen Dosisleistungsmeßstellen in der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen H.C. Salfeld, R. Düren, W. Mues, R. Karmann, K. Kirchhoff	163
19	Schnellmethoden zur Analyse von Alphastrahlern in Umweltproben R. Winkler, E. Frenzel, H. Rühle, J. Steiner	169
20	Testing of a rapid technique for isolating Strontium from liquid milk by sequential extraction with a chelating resin and a crown ether followed by simultaneous determination of Sr-89 and Sr-90 by liquid scintillation spectrometry D. Tait, A. Wiechen	176
21	Computer assisted evaluation of activities of Sr-89 and Sr-90 from a single liquid scintillation spectrum G. Haase, D. Tait, A. Wiechen	182
22	Schutz der Schweizer Bevölkerung bei radiologischen Störfällen: Dosis-Maßnahmen-Konzept und Einsatzorganisation Radioaktivität H. Brunner	188
23	Messen, Auswerten und Bewerten im Integrierten Mess- und Informationssystem für die Überwachung der Umweltradioaktivität (IMIS) A. Bayer, D. Noßke, J. Burkhardt, A. Löbke-Reinl, M. Werner	194
24	Programmsystem zur Abschätzung und Begrenzung radiologischer Konsequenzen (PARK) J. Gregor, P. Jacob	200

#### Ausbreitung in Ökosystemen

25	Ermittlung von Ausbreitungsbedingungen mit Hilfe von Windkanalversuchen bei Vorliegen von Störeinflüssen im Rahmen von Umgebungsbelastungsrechnungen A.-M. Rall, K.-H. Lehmann	206
26	Einbindung von Windkanalversuchen und Lagrange'schem Ausbreitungsmodell in die Einsatzplanung bei aktuellen Freisetzen W.J. Müller, A. Lohmeyer, M. Schatzmann, L. Janicke, C. Salfeld	212

Nummer		Seite
27	Ausbreitungsuntersuchungen in nichtebenem Gelände K. Heinemann	218
28	Berücksichtigung der Einflüsse komplexer Geländestrukturen im Gauss'schen Dispersionsmodell B. Bachmann, V. Herrnberger	224
29	Bodenkonzentrationen und Boden-Pflanzentransferfaktoren natürlicher Radionuklide aus der Thoriumzerfallsreihe in einem Gebiet mit hohem Thoriumgehalt des Bodens R. Schupfner, H. Schüttelkopf, A. Müller	229
30	Experimentelle Bestimmung des Washout- und Snowout-Koeffizienten für aerosolgebundene Radionuklide und Vergleich mit Rechenergebnissen H. Sparmacher, K. Fülber, H. Bonka	235
31	Radiocäsium in Waldökosystemen 1987 - 1990 U. Fielitz	241
32	Transferprozesse von Cäsium-Radionukliden in Wald-Ökosystemen G. Zibold, J. Drissner, W. Erb, Th. Herrmann, M. Hund, G. Lindner, H.J. Schodlock, Ch. Wilhelm, J. Wolf	247
33	Minimale Compartment-Modelle zur Beschreibung des Jod- und Cäsium-Transfers über den Gras-Kuh-Milch-Pfad G. Kirchner	253
34	Verteilung von schwerflüchtigen Radionukliden mit dem Fallout vom Kernreaktor-Unfall in Tschernobyl G. Lindner, S. Kaminski, B. Schell, H.-J. Schodlock, U. Wahl, Ch. Wilhelm	259
35	In der Bundesrepublik Deutschland durch den Unfall in Tschernobyl abgelagerte Cs 134- und Cs 137-Aktivität H. Bonka	265
36	Entfernungs- und Akkumulationsprozesse von Cäsium-Radionukliden in Seen des Voralpengebietes G. Lindner, I. Greiner, R. Grom, K. Hain, M. Ibler, S. Kaminski, J. Kleiner, W. Pfeiffer, J. Robbins, O. Seewald, Ch. Wilhelm, M. Wunderer	271
37	Auswirkung des Reaktorunfalls von Tschernobyl auf Oberbayerische Seen: Compartment-Modellrechnung K. Hübel, W. Sängler, J. Litzke	277
38	Ausbreitung von Radionukliden und Strahlenexposition nach Auslaugung einer erstarrten Kernmaterial-Beton-Schmelze durch Grundwasser A. Bayer, W. Tromm, I. Al-Omari	283
39	Ableitung radioaktiv kontaminierter Abwässer aus kerntechnischen Anlagen in kommunale Kanalsysteme, Expositionspfade für Beschäftigte und die Bevölkerung R. Metzke, K.-H. Lehmann	289

Natürliche und zivilisatorisch bedingte Umweltradioaktivität

40	Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten E. Ettenhuber, W. Röhsch	291
41	Messung von Radon und Radonfolgeprodukten in Luft W. Ullmann	298
42	" Pre-existing " Expositionssituationen durch natürliche Radionuklide S. Przyborowski	304
43	Der Arbeitskreis Uranbergbau und radioaktive Altlasten (AKURA) E. Ettenhuber	310
44	Die Strahlenexposition durch Radon und Radon-Folgeprodukte in Gebäuden der Bergbauggebiete in Sachsen und Thüringen und eine Analyse der Ursachen R. Czarwinski, R. Lehmann	313
45	Untersuchungen in " high radon areas " in Deutschland G. Keller, M. Schütz	324
46	Langfristige Radonausbreitung aus Großquellen und deren meßtechnische Erfassung J. Schmitz, M. Urban, H. Kiefer	330
47	Radon-Messungen in Schweizer Wohnhäusern H. Völkle, B. Sturny, F. Steffes, P.-A. Tercier, R. Truffer, M. Schnyder, Ch. Johner	338
48	Die geogene Radonkonzentration in Gebäuden der neuen Bundesländer R. Lehmann, R. Czarwinski	344
49	Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Gleichgewichtsfaktors zwischen Radon-222 und seinen Folgenukliden in Wohnräumen E. Weinbrecht, K.-H. Folkerts, R. Grillmaier	354
50	Langzeit-Beobachtung des Radon-Pegels in Gebäuden: Ergebnisse, Beobachtungen und Kommentare zur Sanierung V. Genrich	359

Emissionsüberwachung

51	Kernreaktor-Fernüberwachungs-geeignete Emissionsüberwachung bei Druckentlastung des Sicherheitsbehälters D.E. Becker, K.D. Wunsch, H. Starke	365
52	Probennahme bei auslegungsüberschreitenden Störfällen C.-D. Schegk, D. Telschow, L. Labno	371
53	KFÜ-Instrumentierung mit hochauflösender Gamma-Spektroskopie im On-Line Betrieb H.C. Salfeld, G. Roth	377

Nummer		Seite
54	Fehlerabschätzungen bei der Emissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen H. Korn, J. Kühne	383
55	Aerosolmonitor FHT 59 Si: On-Line Monitor zur simultanen Überwachung aerosolgebundener künstlicher Alpha- und Betastrahler A. Gagel, M. Iwatschenko-Borho, B. Hofmann, R. Löw, K. Buijs, J.P. Servranckx, P. Burger, G. Wagner, E. Frenzel	389
56	PC-gestützte Meßwertdarstellung für kontinuierlich arbeitende Monitore M. Iwatschenko-Borho	395
57	Vernetzungskonzept der Emissions- und Prozeßüberwachung in kerntechnischen Anlagen L. Hornung, H.P. Wichmann, M. Schloß	401
 <b>Sitzungen B 1 - B 4</b>		
<b>Nichtionisierende Strahlung</b>		
58	Nichtionisierende Strahlung P.G. Fischer	407
59	Wirkung niederfrequenter Magnetfelder auf den Menschen I. Ruppe, S. Eggert, S. Goltz, D. Bräuer	416
60	Amplituden- und Frequenzfenster der biologischen Wirkungen elektrischer und magnetischer ELF-Felder N. Leitgeb	422
61	Finite element analysis of low frequency electric and magnetic fields in power systems W. Mees, R. Belmans, W. Geysen, E. Freeman	428
62	Einfluß eines homogenen statischen Magnetfeldes auf die Poly-ADP-Ribosylation von Plasma- und Nukleoproteinen menschlicher Nieren-T1-Zellen F.H.A. Schneeweiss, F. Xia, R.N. Sharan, L.E. Feinendegen	434
63	Wirkung homogener, statischer Magnetfelder auf biologische Systeme - Nutzen oder Risiko L.E. Feinendegen, K.I. Altman, H. Mühlensiepen, H.-P. Peterson, F. Schneeweiß, K.-H. v. Wangenheim	439
64	Wirkung homogener, statischer Magnetfelder auf L929 Zellen H. Trepels-Beeck, S. Wirtz, H. Mühlensiepen, L.E. Feinendegen	445
65	Vergleich von Feldmeßgeräten zur Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder W. Hadrian, F. Hofbauer, R. Jobst	450

Nummer		Seite
66	Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern im Alltag : 1. Wissenschaftliche Grundlagen zur Festlegung von Immissionsgrenzwerten J.H. Bernhardt, R. Matthes	456
67	Das Verhalten elektronischer Implantate im elektrischen 50-Hz-Feld E. David, G. Platzer, J. Reißweber, M. Pfothner, D. Peier, H. Hirsch, H. Senftleben	462
68	Sicherheitsaspekte bei der Kernspintomographie F. Wolf	469
69	Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern im Alltag : 2. Ergebnisse epidemiologischer Studien B. Grosche, J.H. Bernhardt, H. Jahraus	475
70	Sicherheit von Personen mit implantierten Herzschrittmachern in elektromagnetischen Feldern V. Hansen, X. Xu, H.-J. Meckelburg	481
71	Absorption im Nahfeld aktiver Antennen und passiver resonanter Strukturen oberhalb 300 MHz N. Kuster	487
	Elektrische und magnetische Felder	
72	1. - Grenzwerte und internationale Normung - N. Krause	
73	2. - Felder in Umwelt und Industrie - N. Krause	493
74	Internationale Aktivitäten auf dem Gebiet des Schutzes vor nichtionisierenden Strahlen J.H. Bernhardt	516
75	Einwirkung von Infraschall auf den Menschen R. Borgmann	522
76	Ultraschall - Sicherheit in der Medizin K. Brendel	531
77	Infrarotstrahlung - Wirkungen, Grenzwerte, Schutzmaßnahmen H. Siekmann	537
78	Lichteinwirkungen auf die Nachbarschaft und Allgemeinheit: Messung und Beurteilung H.M. Müller	544
79	Ultraviolettstrahlung, Risiken und Schutzmaßnahmen H. Jossen	550
80	Schutz vor Laserstrahlung: Eine Aufgabe für den Arbeitsschutz H. Brüggemeyer	556
81	Laserstrahlung: Aus der Laser-Blattsammlung des AK-NIR Th. Siewert, H. Brüggemeyer	562

Nummer		Seite
82	Erfahrungen bei Prüfungen von Discolasern S. Stockfleth, P.G. Fischer	568
83	Laser und UV-Strahlung - Sicherheitsüberwachung - D. Stehr	572
84	Strahlung an Bildschirmgeräten W. Anderl, K. Giesen	578

## BAND II

### Sitzungen C 1 - C 2

#### Strahlenschutz am Arbeitsplatz

85	Neuere Tendenzen im radiologischen Arbeitsschutz H.-J. Hardt	585
86	Radiation Protection Legislation in the Nordic Countries L. Persson	600
87	Die Novellierung der Strahlenschutzverordnung - Auswirkungen auf die betriebliche Praxis in Kernkraftwerken - J. Hesse, D. Mertin, W. Mohrmann, L. Bergemann, H. Steinberger	606
88	Technische und organisatorische Massnahmen zur Minimierung der Strahlenbelastung des Personals in einem großen Kernkraftwerk N. Eickelpasch, R. Seepolt, M. Lasch	612
89	Aus der Praxis - für die Praxis: Organisatorische Fragen bei Tätigkeiten in fremden kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen gemäß §20 Strahlenschutzverordnung S. Vogt	618
90	Lagerung von radioaktiven Stoffen und ihre Risiken H. Schällibaum, Th. Lauffenburger, H. Jossen	624
91	Umschlossene radioaktive Stoffe; Konzepte, Erfahrungen, (Schein-?)Probleme H. Kowalewsky	627
92	Welche Auswirkungen hat die novellierte Röntgenverordnung auf die Strahlenexposition des Patienten und des Personals in der Medizin ? K. Ewen	635
93	Occupational and medical exposures in Brazil A.M. Campos de Araujo, P.G. Cunha, G. Drexler, L. Virhas	639
94	Medical radiation exposures of patients: variations between countries J. Valentin	645

Nummer		Seite
95	Ionisierende Strahlen: Expositionen - Überwachung - Beruf - Erkrankung Konvergenz oder Divergenz? P.-J. Jansing, A. Meyer-Falcke	651
96	Bestrahlung der Arbeiter radiotherapeutischer Arbeitsplätze bei der Brachytherapie M. Mikušová, H. Žáčková, V. Klener, A. Drábková	657
97	Strahlenbelastung durch Radon an Arbeitsplätzen außerhalb des Brennstoffkreislaufes J. Schmitz, R. Fritsche	662
98	Activity size distribution of the radon daughters aerosol in mines and tourist caves J. Porstendorfer, G. Butterweck, A. Reineking, J. Kesten	670

## **Sitzungen D 1 - D 2**

### **Kontamination und Dekontamination**

99	Der Arbeitskreis Dekontamination (AKK) im Fachverband für Strahlenschutz K.J. Traub	677
100	Rückstandsfreie bzw. -arme Strahlverfahren zur Dekontamination metallischer Komponenten A. Steringer, A. Krakowski, H. Kratz, T. Moser, M. Suchowitz	682
101	Empfehlungen zur Personendekontamination G. Heinemann, H. Pfob	688
102	Produkte zur Labor- und Personendekontamination K. Henning, H. Vogt	695
103	Wirkungsgrad von Kontaminationsmonitoren M. Heinzlmann, M. Hoffmeister	701
104	Aktivitätsbestimmung kontaminierter Wäschestücke, Laborabfälle und Werkzeugteile R. Lin, L. Hornung, G. Rupp	706
105	Meßtechnische Voraussetzungen zur schnellen Auffindung und Bergung "heißer" Trümmer-Fragmente im Zusammenhang mit dem Absturz von nuklear bestückten Satelliten V. Genrich	709
106	Suchgerät für radioaktive Partikel M. Heinzlmann, H. Schüren	715
107	Einrichtung und Betrieb von Notfallstationen im Rahmen des Katastrophenschutzes in der Umgebung kerntechnischer Anlagen M. Griesbach, H. Miska	721

**Sitzungen E 1 - E 3****Äußere Strahlenexposition**

108	Der Arbeitskreis "Dosismessung externer Strahlung" im Fachverband für Strahlenschutz W.G. Alberts, E. Piesch	727
109	Stand der Technik in der Photonendosimetrie K. Hohlfeld, P. Ambrosi, U. Lauterbach, B. Burgkhardt, E. Piesch, J. David	736
110	Intelligente Sonde FHZ 601 A für die Ortsdosimetrie B. Hofmann, H. Faatz, J. Frowein, H. Schleicher, S. Allers, A. Wicke	746
111	30 Jahre TLD an der TU Dresden K. Hübner, J. Fellingner, T. Hahn, P. Schmidt	752
112	Ausgewählte Ergebnisse dosimetrischer Untersuchungen an Bord sowjetischer Raumflugkörper der "KOSMOS"-Serie P. Schmidt, J. Fellingner, K. Hübner	758
113	Neue Äquivalentdosismeißgrößen und ihre Einführung in die Praxis G. Dietze, W. Alberts, C. Wernli, W. Will	764
114	Fortschritte auf dem Gebiet der Dosimetrie für Strahlung geringer Eindringtiefe E. Piesch, J. Böhm, B. Burgkhardt, M. Heinzemann, J. Fellingner, K.-H. Ritzenhoff	774
115	Einsatz von Proportionalzählrohren in tragbaren Dosisleistungsmessern H. Schlösser, H. Faatz	784
116	Eigenschaften von LiF:Mg,Cu,P-Tl-Detektoren für die Umgebungsüberwachung K. Prokert, N.A. Karpov, J. Fellingner	789
117	Linearkombination von Filmfilterkurven für praxisnahe Photonen-Energiebereiche E. Börner, J. David, H. Schraube	794
118	Probleme der Beta-Dosimetrie in Kernkraftwerken J. Fellingner	800
119	Ein Verfahren zur Ermittlung der Hautdosis in Beta/Gamma- Strahlungsfeldern mittels eines dicken Thermolumineszenzdetektors P. Sahre, W. Roßbander	806
120	Stand der Meßtechnik in der Neutronendosimetrie B. Dörschel, W.G. Alberts, H. Klein, E. Piesch, P. Pihet, H. Schraube	812
121	Tendenzen und Grenzen der Neutronenpersonendosimetrie bei Energien im MeV-Bereich M. Höfert	822

Nummer		Seite
122	Berechnung der Neutronen-Empfindlichkeit für LiF-Thermolumineszenzdetektoren T. Hahn, J. Henniger, K. Hübner	831
123	MOS-Sensoren zum Nachweis von Neutronen und hochenergetischer Photonenstrahlung G. Streubel, J. Reinhard, K. Kadner, B. Dörschel	837
124	Vergleich von berechneten und gemessenen Neutronen-Empfindlichkeiten eines Elektret-Albedodosimeters H. Seifert, B. Dörschel, J. Pawelke	843
125	Neutronenblasendetektoren - Zählrohre Vergleichende Messungen mit schnellen Neutronen W. Rosenstock, J. Schulze, H.-L. Kronholz	849
126	Kalibrierung und Prüfung von Ortsdosisleistungsmessern für Neutronen H. Kluge, H. Seifert	855
 <b>Sitzungen F 1 - F 2</b> <b>Innere Strahlenexposition</b>		
127	Der Arbeitskreis Inkorporations-Überwachung im Fachverband für Strahlenschutz H. Schieferdecker, K. Henrichs	861
128	Auswertung von Inkorporationsmessungen mit dem Ganzkörperzähler U. Wellner	863
129	Direktmessung in der Routineüberwachung bei Siemens, Brennelementewerk Hanau R. Sommer-Ballat	869
130	Ganzkörperzähler mit Halbleiterdetektoren K.-D. Keller, H. Doerfel, W. Müller-Schauenburg, U. Feine	875
131	Direktmessung von Am-241 mit Phoswich- und Germanium-Detektoren H. Doerfel, U. Mohr, T. Reddmann, A. Zieger	876
132	Überwachung der Schilddrüsenaktivität in der Schweiz - Methode und Kalibrierung - J.-F. Valley, A. Besançon, J. Berlie, P. Lerch	881
133	Vergleichsmessungen als Qualitätskontrolle der Direktbestimmung der Körperaktivität E. Werner, P. Roth, Ch. Hansen, R. Kunkel, K. König	887
134	Probleme bei der Interpretation von Inkorporationsdaten markierter organischer C-14-Verbindungen P. Sahre	893

Nummer		Seite
135	Bestimmung der Folgeäquivalentdosis nach einer Plutonium/Americium-Wundkontamination H. Doerfel	899
136	Dosis-Ermittlung nach einer Pu/Am-Wundkontamination K. Henrichs	905
137	Novellierung der Richtlinie zur physikalischen Strahlenschutz-Kontrolle: Innere Exposition W. Bentele, D. Beyer, H. Dilger, H. Erlenbach, K. Henrichs, W. Riedel, W. Roth, R. Scheler, W. Wagner, H. Zeising	909
138	Messung der Cs 134 sowie Cs 137-Aktivität bei erwachsenen Personen aus Aachen nach dem Kernreaktorunfall in Tschernobyl R. Kreh, H. Bonka	920
139	Fallstudie einer Xe-133-Inhalation P. Sahre, K. Thieme, E. Müller	926
<b>Sitzungen G 1 - G 2</b>		
<b>Entsorgung</b>		
140	Der Arbeitskreis Entsorgung im Fachverband für Strahlenschutz - Zielsetzung und Tätigkeiten G.G. Eigenwillig	933
141	Problematik der Festlegung von Aktivitätsgrenzwerten für schwach radioaktiv kontaminierte Abfälle M.K. Müller-Neumann	943
142	Anforderungen an die Erfassung und Sammlung schwach kontaminierter radioaktiver Abfälle und ihre konventionelle Beseitigung Th. Bünger, I. Gans, H. Rühle	949
143	Aktivitätsfluß eines modernen Kohlekraftwerks D.E. Becker, A. Rohrer	955
144	Strahlenexposition der Bevölkerung durch die Verwertung von Reststoffen R. Graf, R. Görtz	961
145	Entsorgungskonzept für Abfälle aus dem Umgang mit radioaktiven Stoffen aus Medizin und Forschung H.-J. Reinecke	967
146	Endlagerungsanforderungen: Aspekte der Realisierung der Schutzziele am Beispiel Konrad D. Ehrlich, H.P. Berg, A. Wohanka	973
147	Konzept zur und Erfahrungen bei der Entsorgung der Anwender der Atomenergie in der ehemaligen DDR von radioaktiven Abfällen D. Zappe	979

Nummer		Seite
148	Verfahren zur Entsorgung verbrauchter Steuerelemente und Brennelementkästen aus Siedewasserreaktoren E. Gidarakos, W. Spalthoff	980
149	Die Frage des radioaktiven Abfalles in Ungarn E. Virágh	986
150	Bergung von Co-60-Bestrahlungsquellen aus Trinkwasserbrunnen R. Bartels	991

## **Sitzung H 1**

### **Ausbildung**

151	Arbeitskreis Ausbildung (FS AKA) R. Spiess	995
152	Kritische Gedanken zur Strahlenschutzausbildung H.G. Vogt	999
153	Kritische Anmerkungen zu den neuen Strahlenschutzvorschriften H. Lenne, B.U. Edelmann, J. Steuer	1000
154	Strahlenschutzausbildung in der industriellen Radiografie B. Sölter, H.-J. Sy	1005
155	Strahlenschutzausbildung von Klinikingenieuren an der TH Ilmenau/Thüringen A. Keller, G. Henning, B. Menzel, J. Steuer	1009
156	Das Studium an der Berufsakademie Karlsruhe zum Dipl.-Ing. (BA) in der Fachrichtung Umwelt- und Strahlenschutz W. Kraut, H. Schweizer	1014

## **Sitzung I 1**

### **Strahlenwirkung**

157	Risiko im Strahlenschutz - Probleme bei der Grenzwertableitung der neuen ICRP-Empfehlungen M. Schmidt	1017
158	Strahlungshormesis des Krebses K.-H. Weber	1023
159	Anpassungsreaktionen bestrahlter Zellen im Gewebe L.E. Feinendegen, H. Mühlensiepen, K.I. Altman, J. Booz	1029

Nummer		Seite
160	Wirkungen niedriger Gamma-Ganzkörperstrahlendosen auf die Aktivität der Acetylcholinesterase in Knochenmarkzellen der Maus S. Stegmann, H. Mühlensiepen, A. Fixmann, K.I. Altman, L. E. Feinendegen	1036
161	Bedeutung der intrazellulären Glutathionkonzentration für die Reaktion der Thymidinkinase auf kleine Strahlendosen H. Mühlensiepen, U. Hennesen, L.E. Feinendegen	1040
162	Langzeit-Spätfolgen nach Injektionen von Radium 224 E. Eder, J.P. Scharff, H. Spiess	1044
163	Sterben Einwohner von Häusern mit extrem hohen Radonkonzentrationen im Keller tatsächlich früher ? Fallstudie Weißenstadt 1700 bis 1950 K. Ott, B. Sansoni	1052
<b>Sitzung J 1</b>		
<b>Nachweisgrenzen</b>		
164	Nachweisgrenzen und statistische Meßwertaufbereitung K. Kirchhoff	1061
165	Nachweis- und Erkennungsgrenzen bei spekrometrischen Kernstrahlungsmessungen L. Baringhaus, O. Mende, R. Michel, C.D. Wüneke, H. Zimmermann	1070
166	Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Anzeige bei Ratemetern K. Weise	1076
167	Untersuchungen zur Festlegung von Nachweis- und Erkennungsgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen mit Berücksichtigung der Probenbehandlung L. Baringhaus, O. Mende, R. Michel, C.D. Wüneke, H. Zimmermann	1082
168	Verzögerungsarme Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung durch informationsschonende und fehlerminimierend integrierende Filterung der stochastischen Detektorsignale H. Borst	1088
169	Neumessung der Gamma-Intensitäten von $^{234m}\text{Pa}$ als Zerfallsprodukt des $^{238}\text{U}$ K. Siemon, R.A. Esterlund, M. Knaack, J. vanAarle, W. Westmeier, P. Patzelt	1094
<b>Autorenverzeichnis</b>		1101
<b>Sachverzeichnis</b>		1105

# KREBSMORTALITÄT IN HIROSHIMA UND NAGASAKI

- Zur Neubewertung der Strahlenrisiken -

CANCER MORTALITY IN HIROSHIMA AND NAGASAKI

- The New Assessment of Radiation Risks -

A.M.Kellerer,

Strahlenbiologisches Institut der Ludwig-Maximilians-Universität, München und

Institut für Strahlenbiologie der GSF, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit.

## Zusammenfassung:

ICRP hat 1977 zum ersten Mal Risikokoeffizienten für strahleninduzierte Krebsmortalität angegeben. Diese Zahlen stützen sich vor allem auf die Beobachtungen an den Atombomben-Überlebenden. Durch die Revision der Atombomben-Dosimetrie und die Weiterführung der Beobachtungen bis zum Jahr 1985 ergaben sich erhöhte Risikoschätzungen. Ihre Zahlenwerte und die Ursachen für die Änderung werden diskutiert. Die Risikoschätzungen für die in jungem Alter Bestrahlten sind noch unsicher. Die neuen Empfehlungen der ICRP basieren auf Berechnungen, die sich aus dem Modell des relativen Risikos ergeben, das im Widerspruch steht zu dem beobachteten Trend abnehmender Proportionalitätsfaktoren des Exzeßrisikos mit zunehmender Zeit nach Bestrahlung. Ein modifiziertes Modell des relativen Risikos, bei dem die Proportionalitätsfaktoren nur vom erreichten Alter abhängen, führt für Bestrahlungen im Alter von weniger als 30 Jahren zu deutlich geringeren Projektionen in die Zukunft. Gemittelt über alle Altersstufen erhält man Risikowerte, die etwa halb so hoch sind wie die Schätzungen der ICRP. Mit dem modifizierten Modell erhält man ohne den hypothetischen Reduktionsfaktor zur Extrapolation auf kleine Dosen etwa die gleichen Risikokoeffizienten, wie sie von ICRP angegeben werden.

## Abstract:

ICRP has, first in 1977, given the numerical risk estimates for radiation induced cancer mortality. They were largely based on the results of the epidemiological follow-up of the atomic bomb survivors. The revision of the atomic bomb dosimetry and the extension of the follow-up to the year 1985 have led to substantially increased risk estimates. The new values and the reasons for the change are discussed. The excess risks for those who were exposed at young age are still uncertain. ICRP bases its recent recommendations on a relative risk model where the relative excess rates depend on dose and on age at exposure. This model leads to high projected risk estimates for those exposed in young age. However, it conflicts with the observation that the relative rates decrease in the younger cohorts with time after exposure. A modified relative risk model where the relative excess rates depend on age attained is in better agreement with the observations. It leads to substantially smaller projected risks for those exposed before age 30. Averaging over of all ages leads to risk estimates that are lower by a factor 2 than current assumptions. Abandoning the hypothetical dose reduction factor one obtains from the modified model the same risk estimates for cancer mortality, except leukemia, as they are given by ICRP.

## 1. Vorbemerkung.

Die möglichen Risiken der Strahlenexposition stehen so sehr im Brennpunkt öffentlicher Auseinandersetzung, daß es angebracht ist, das Tagesgeschehen vor dem Hintergrund der größeren Entwicklung zu betrachten. Hier aber zeigt sich ein erstaunlicher Wandel von naivem Optimismus zu maßlosen Ängsten. Als Röntgen 1895 die Entdeckung der neuen Art von Strahlung bekannt gab, erhob sich innerhalb weniger Tage weltweit ein Sturm der Begeisterung. Jedermann begann, Röntgenröhren zu bauen und sie ohne Gedanken an gesundheitliche Gefährdungen zu benutzen.

Es war charakteristisch für die Fortschrittsgläubigkeit des ausgehenden 19. Jahrhunderts, daß man in Röntgens Entdeckung nicht die erste Erschütterung sah, die Jahre später zum Einsturz des klassischen Weltbildes der Physik führen sollte. Stattdessen wurde Röntgenstrahlung nur als Symbol ungeahnter technischer Möglichkeiten gesehen und, mit ihrem medizinischen Einsatz, auch als Symbol geheimnisvoller, positiver Kräfte. Diese Anschauung änderte sich nicht, als man bereits 1905 - 7 Jahre, bevor man überhaupt die Wellennatur der Röntgenstrahlen erkannte - in Berlin gehäuft auftretende Leukämien unter Radiologen beobachtete. Man sah das als eine bloße Folge exzessiver und langandauernder Überexposition an.

Noch Jahrzehnte später mußte es zu schlimmen Tragödien des ungeschützten Umgangs mit Röntgenstrahlung und Radionukliden kommen, bevor erste Warnungen laut wurden. Eine der schlimmsten Tragödien war das Schicksal der Zifferblattmalerinnen, Hunderter von jungen Frauen, die vor allem in den Vereinigten Staaten Uhren und auch Flugzeugarmaturen mit radiumhaltiger Leuchtfarbe bemalten. Da sie im Akkord arbeiteten, spitzten sie die Pinsel auf die schnellste Weise, nämlich mit dem Mund, und inkorporierten dabei große Aktivitäten des langlebigen Radiums-226. Viele dieser Frauen gingen später an Knochentumoren zugrunde. Als ein junger Arzt, Harrison Martland, von einem befreundeten Zahnarzt über die Kieferschäden der Zifferblattmalerinnen erfuhr, publizierte er die Vermutung, daß es sich hier nicht um die Toxizität des Phosphors, sondern um die Wirkungen ionisierender Strahlung handle. Als Reaktion erschien ein empörter Leserbrief, in dem er der Scharlatanerie bezeichnet wurde, da man doch wisse, daß ionisierende Strahlen im Prinzip zwar Gesundheitsschäden hervorrufen könnten, aber eben nur bei langdauernden Überexpositionen. Was den Brief so bemerkenswert machte, ist die Tatsache, daß er von Madame Curie kam, die wenige Jahre später selber ein Opfer der Leukämie wurde.

Andere Beispiele mit schlimmen Folgen sind zu nennen. Eines dieser Beispiele war die Verwendung des Kontrastmittels Thorotrast zur Darstellung der Blutgefäße im Röntgenbild. Als  $\alpha$ -Strahler führte das Thorotrast noch Jahrzehnte später in den Patienten zu einer weit überhöhten Rate von Lebertumoren. Ein weiteres Beispiel war die hochdosierte Injektion des kurzlebigen Radiums-224 in einer deutschen Klinik kurz nach dem Zweiten Weltkrieg zur Behandlung von Kindern, die an Knochentuberkulose litten, und von Erwachsenen Morbus-Bechterew-Patienten. Fast 60 der Patienten starben später an Knochentumoren.

Die schließliche Wandlung der Einstellung gegenüber den Risiken ionisierender Strahlen ergab sich aber nicht aus den Warnungen durch den industriellen oder medizinischen Mißbrauch ionisierender Strahlung. Sie wurde bewirkt durch den Abwurf der Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki. Diejenigen, die die Bomben einsetzten, dachten nicht an Gesundheitsschäden durch Strahlung, sondern nur an die Wirkung von Hitze und Druck. Als jedoch in den frühen fünfziger Jahren das gehäufte Auftreten von Leukämien unter den Atombomben-Überlebenden deutlich wurde, begann man zu verstehen, daß ionisierende Strahlung durch ihre Wirkung auf einzelnen Moleküle der Erbsubstanz einzelner Zellen somatische Mutationen auslöst, die Leukämie hervorrufen können. Damit war das Dogma gefallen, daß es eine Schwellendosis geben müsse, unterhalb der gesundheitliche Schäden auszuschließen sind. Man rechnete stattdessen damit, daß selbst einzelne geladene Teilchen, mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit, Tumorerkrankungen auslösen können. Aufgabe des Strahlenschutzes konnte es danach nicht mehr sein, alle Strahlenwirkungen völlig auszuschalten. Stattdessen wurde es zum Ziel, Strahlenexpositionen in vernünftigem Maß zu reduzieren und auch kleine Dosen möglichst zu vermeiden oder zu vermindern. Dies ist bis heute das Prinzip des Strahlenschutzes geblieben.

Gleichzeitig bewirkten die Atombomben die große Wende in der öffentlichen Einstellung zu ionisierender Strahlung. Strahlung wandelte sich vom Symbol des Fortschrittes und vom Träger positiver Kräfte zum Inbegriff der Bedrohung und des Verderbens. Die Ängste und Befürchtungen mußten sich in den Jahren der atmosphärischen Kernwaffenversuche verstärken; sie verlagerten sich auch auf die friedliche Nutzung der Kernenergie und haben sich bis heute nicht verringert. Als der Reaktor in Tschernobyl in Brand geriet, war das nicht mehr die unerwartete technische Katastrophe, sondern die Bewahrheitung oft beschworener Ängste. Wo früher Strahlenrisiken völlig mißachtet wurden, werden sie nun weit über anderen vergleichbaren Risiken eingeschätzt.

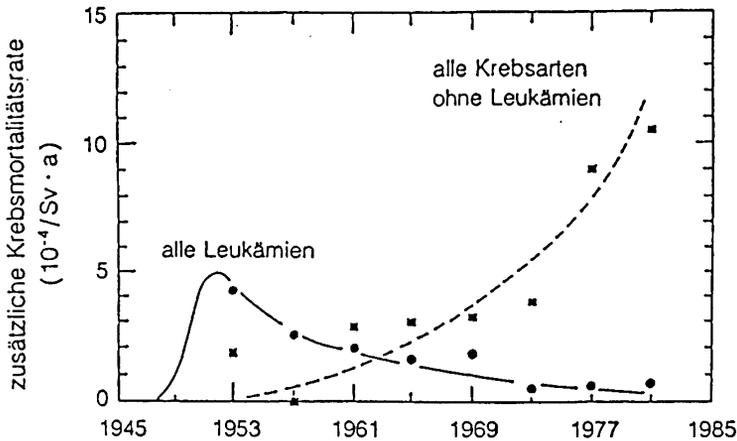
Die kritische Haltung der Öffentlichkeit zum Problem der Risiken auch kleiner Strahlendosen und die verschärften Dosisgrenzwerte im Strahlenschutz, die sich aus den neuen Empfehlungen der ICRP /1/ ergeben, machen ein quantitatives Verständnis der Strahlenrisiken wichtiger als bisher. Unter diesem Gesichtspunkt soll im folgenden ein Überblick über die Neubewertung der Krebsmortalität der Atombomben-Überlebenden gegeben werden.

## **2. Grundlegende Beobachtungen zur Krebsmortalität in Hiroshima und Nagasaki.**

Die epidemiologische Studie über das Schicksal der Atombomben-Überlebenden wurde an etwa 75 000 Personen, dem Life-Span-Study-Sample (LSS), durchgeführt. Zunächst benützte man nur sehr ungefähre Dosis-schätzungen; seit 1956 stützte man sich auf ein vorläufiges Dosimetriesystem, das im Oak Ridge National Laboratory entwickelt wurde und als TD 65 (Tentative Dosimetry 1965) bezeichnet wird. Nach diesem Dosimetriesystem spielten in Hiroshima neben den  $\gamma$ -Strahlen auch

die schnellen Neutronen eine bedeutsame Rolle, während in Nagasaki der Beitrag der Neutronen zu vernachlässigen war. Der Unterschied der Strahlenqualität ergab sich aus der Tatsache, daß die Plutoniumbombe in Nagasaki von Tonnen konventionellen Sprengstoffes umgeben war, der als Material niederer Ordnungszahl die Spaltneutronen abschirmte. Die Uranbombe in Hiroshima dagegen war lediglich von einer massiven, die Neutronen nur wenig abschirmenden Metallhülle umgeben.

In den ersten Auswertungen des LSS wurde die Anzahl der Krebstodesfälle pro Jahr bestimmt und durch die Gesamtzahl der Personen dividiert. Von dieser beobachteten gesamten Krebsmortalitätsrate wurde die spontane Rate, d.h. der entsprechende Quotient für nicht exponierte Personen abgezogen. Die so bestimmte zusätzliche Krebsmortalitätsrate ist, auf die Dosis bezogen, d.h. durch die mittlere Äquivalentdosis dividiert, in Abb.1 dargestellt. Man kann die an der Ordinate



**Abb.1.** Durch die Strahlenexposition hervorgerufene Erhöhung der Krebsmortalitätsrate im Kollektiv der Atombomben-Überlebenden. Jeder Punkt entspricht den Daten aus 4 Beobachtungsjahren. Die interpolierenden Kurven dienen lediglich der leichteren Lesbarkeit. Die Daten sind beeinflusst durch eine sich zeitlich verändernde Altersverteilung der Atombomben-Überlebenden und sind nicht unmittelbar mit Risikoschätzungen zu verknüpfen /3/.

angegebenen Zahlen verstehen als zusätzliche Krebstodesfälle, die in dem betreffenden Jahr in einer Gruppe von 10 000 mit 1 Sv exponierten Personen auftreten. Allerdings differenziert die Analyse in dieser einfachen Form weder nach Alter, noch nach Geschlecht, noch nach Dosis und sie ist daher in dieser Form nicht zur Abschätzung von Risikoeffizienten geeignet. Sie zeigt jedoch die ganz

unterschiedlichen zeitlichen Verteilungen der strahleninduzierten Leukämiefälle und der erst viel später auftretenden soliden Tumoren. Die wesentliche Beobachtung ist, daß die zusätzlichen Leukämien bereits wenige Jahre nach Strahlenexposition auftraten, zum Teil wohl schon bevor die epidemiologische Studie begann. Die statistische Analyse zeigt, daß zu Beginn der fünfziger Jahre die Rate der strahleninduzierten Leukämien in dem LSS die spontane Rate übertraf. Später näherten sich die Leukämieraten wieder der spontanen Inzidenz. Bis 1985 werden von insgesamt aufgetretenen etwa 300 Leukämien etwa 75 - im Einzelfall nicht aufweisbar, aber statistisch in der Gesamtzahl erschlossen - der Strahlenexposition zugeordnet.

Ganz gegensätzlich zum zeitlichen Verlauf bei Leukämien war die Abhängigkeit der Exzessrate für die soliden Tumoren. Erst 10 Jahre nach der Exposition deuteten sich erste, noch unsichere dosisabhängige Erhöhungen an, erst sehr viel später wurden sie signifikant. Später fand man parallel zu den mit dem Alter der Atombomben-Überlebenden erhöhten Spontaninzidenzen auch wachsende Erhöhungen der mit der Dosis korrelierten zusätzlichen Krebstodesfälle. Insgesamt, und im Gegensatz zur Leukämie, machen die der Strahlung zugeschriebenen Fälle jedoch weniger als 5% aller Krebstodesfälle in dem LSS aus. Von insgesamt etwa 7 000 Krebstodesfällen werden etwa 300 der Strahlung zugeschrieben.

Genauere Ergebnisse erhält man durch eine detaillierte Analyse, die nicht nur die Dosis und die Zeit nach Bestrahlung berücksichtigt, sondern auch das Alter bei Bestrahlung und das Geschlecht. Dadurch lassen sich die wesentlichen Ergebnisse der epidemiologischen Studie in verhältnismäßig einfachen Modellen darstellen. Abb.2 erläutert schematisch den Unterschied zwischen dem Modell des **relativen Risikos** (relative risk model), das für die meisten soliden Tumoren zu gelten scheint, und dem Modell des **absoluten Risikos** (absolute risk model), das sich auf Leukämien bezieht. Im Modell des relativen Risikos (im oberen Teil des Diagrammes) wird angenommen, daß eine einmalige Bestrahlung, nach einer gewissen Latenzperiode von etwa 5 bis 10 Jahren, die spontan und mit dem Alter ansteigenden Tumorraten um einen gewissen Faktor erhöht, der von der Dosis abhängig ist. Die Krebssterblichkeit der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki ist, von der Leukämie abgesehen, für alle Tumorerkrankungen mit einem solchen Modell ungefähr vereinbar. Es wurde daher den statistischen Untersuchungen zugrunde gelegt, und blieb auch die Basis der Risikoschätzungen, die ICRP den neuen Empfehlungen zugrunde legt. Es ist jedoch ungewiß, ob die strahleninduzierten Erhöhungen der Mortalitätsraten auch in Zukunft für die in jungem Alter Bestrahlten noch persistieren und entsprechend den altersbedingten Zunahme der spontanen Mortalitätsraten zunehmen werden. In Abschnitt 4 werden das relative Risikomodell und seine zugehörigen Risikoprojektion kritisch bewertet.

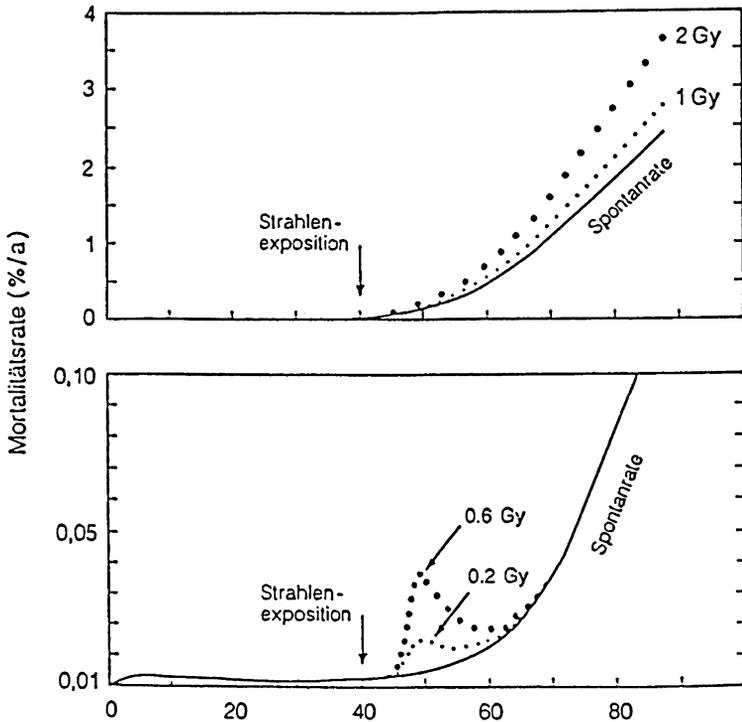


Abb.2. Diagramm der Krebsmortalität nach dem Modell des relativen (oben) und des absoluten Risikos (unten). Die durchgezogenen Kurven entsprechen der spontanen altersspezifischen Krebsmortalität der männlichen Bevölkerung der USA. Die Erhöhungen durch die angegebenen Dosen entsprechen ungefähr den neuen Risikoabschätzungen, allerdings ohne die Annahme eines Reduktionsfaktors, bei der Extrapolation zu kleinen Dosen. Der Pfeil markiert das Alter bei Strahlenexposition.

Im unteren Diagramm der Abb.2 ist der Verlauf angedeutet, der dem Modell des absoluten Risikos entspricht, wie es für Leukämien erschlossen wurde. Auch für Leukämien steigt die spontane Häufigkeit erst im Alter. Nach Strahlenexposition jedoch tritt bereits innerhalb weniger Jahre eine ausgeprägte, jedoch zeitlich begrenzte Welle zusätzlicher Erkrankungen auf.

### 3. Zur Dosisabhängigkeit der Exzeßraten.

#### Die früheren Untersuchungen:

Betrachtet man nur die Überlebenden aus Hiroshima und Nagasaki mit einer Dosis von weniger als 0,5 Sv - und die meisten Personen in dem LSS haben Dosen, die weit kleiner als 0,5 Sv sind - so erhält man keine oder nur gering signifikante Hinweise auf strahleninduzierte Erhöhungen der Tumorraten. Die Erkenntnisse aus der epidemiologischen Studie stützen sich also vorwiegend auf die wenigen Tausend Personen, die höheren Dosen ausgesetzt waren. Gesicherte Aussagen über die Wirkung kleiner Dosen sind daher nicht möglich. Da jedoch die Prinzipien des Strahlenschutzes schon früh auf die vorsichtige Annahme gegründet wurden, daß es für stochastische Schäden keine Dosischwelle gebe, versuchte man bereits in den siebziger Jahren, durch Extrapolation Risikokoeffizienten bei niedrigen Dosen abzuschätzen /4/.

Die damalige Analyse bediente sich des alten Dosimetriesystems TD65 und ergab für Nagasaki nicht-lineare, fast schwellenartige Dosisabhängigkeiten, während die entsprechenden Abhängigkeiten für Hiroshima eher linear waren. Man verstand das als Ausdruck der Tatsache, daß man es in Nagasaki fast nur mit  $\gamma$ -Strahlung zu tun hatte, die bei kleinen Dosen weit weniger wirksam ist als bei hohen Dosen, daß dagegen in Hiroshima der Einfluß der dicht ionisierenden Neutronenstrahlung vorherrschte, die bereits bei kleinen Dosen sehr wirksam ist /5/. Dieser charakteristische, aus strahlenbiologischen Untersuchungen vertraute Unterschied war die Rechtfertigung dafür, bei der Ableitung der Risikokoeffizienten für kleine Dosen von  $\gamma$ -Strahlung einen Reduktionsfaktor anzunehmen.

Kurz nach Veröffentlichung der Risikoschätzungen durch ICRP wurden die ersten Zweifel an der Gültigkeit des alten Dosimetriesystems laut. Neue Erkenntnisse aus strahlenbiologischen Experimenten deuteten auf sehr hohe Werte der relativen biologischen Wirksamkeit von Neutronen bei kleinen Dosen /6,7/. Die dadurch ausgelöste Diskussion um höhere Qualitätsfaktoren für dicht ionisierende Strahlung /8/ führte zu einer kritischen Überprüfung des Einflusses der Neutronen in Hiroshima. Neue Transportrechnungen zeigten, daß im Dosimetriesystem TD65 ein zu hartes Neutronenspektrum angenommen worden war, daß der Einfluß der Luftfeuchtigkeit ungenügend berücksichtigt war, und daß insgesamt die Neutronendosen in Hiroshima überschätzt wurden. Die Revision der Atombombendosimetrie erforderte nahezu ein Jahrzehnt. Im Jahre 1986 wurde sie abgeschlossen.

#### Ergebnisse nach der Dosisrevision:

Das neue Dosimetriesystem (DS86) bestätigt die Annahme, daß die Neutronendosen in Hiroshima überschätzt worden waren /9/. Die Berechnungen ergeben nun selbst für Hiroshima geringe

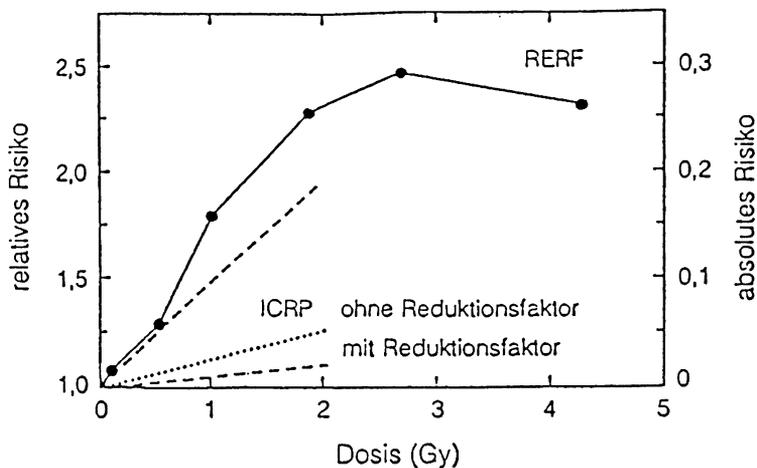
## Beiträge der Neutronendosis.

Da der überwiegende Teil der Strahleneffekte, der vorher den Neutronen zugeschrieben worden war, jetzt der Wirkung der  $\gamma$ -Strahlung zugerechnet wird, war von vornherein zu erwarten, daß die Risikoschätzungen für  $\gamma$ -Strahlung sich erhöhen müßten. Ganz zutreffend war diese Überlegung jedoch nicht, da sich bei der Neuberechnung zwar verringerte Neutronendosen, aber andererseits erhöhte Dosen von  $\gamma$ -Strahlung ergaben. Nach der revidierten Dosimetrie ist also ein größerer Teil der zusätzlichen Krebstodesfälle der  $\gamma$ -Strahlung zuzurechnen, dafür sind aber auch die errechneten Dosen höher. Selbst bei der Dosimetrie der  $\gamma$ -Strahlung kam es zu komplizierten gegenläufigen Veränderungen. Insbesondere ergaben genauere Rechnungen eine stärker abschirmende Wirkung der Häuser als früher angenommen. Andererseits fand man eine deutlich höhere Transparenz des Körpers, d.h. weniger Abschirmung der tiefer liegenden Organe durch den eigenen Körper.

Die Dosisrevision war Anlaß für eine de novo Analyse aller bisher gewonnenen Daten über die Krebsmortalität in Hiroshima und Nagasaki. Die Analyse wurde mit verbesserten statistischen Methoden durchgeführt und ihre Resultate sind in einer Reihe wichtiger Berichte der Radiation Effects Research Foundation in Hiroshima (RERF) dokumentiert /10,12/. Ohne auf Details und organspezifische Resultate einzugehen, seien hier die wesentlichen Resultate angegeben.

Für die gesamte Krebsmortalität ohne die Leukämien wurde das Modell des relativen Risikos benützt (s. Abb.2). Die Berechnungen basierten also auf dem Postulat, daß die Tumorzinidenzen, und damit auch die Mortalitätsraten, nach Bestrahlung zunächst für eine gewisse Latenzzeit von 5 oder 10 Jahren unverändert bleiben, dann aber in einem konstanten Verhältnis zu den altersspezifischen Raten ansteigen. Der Faktor der proportionalen Erhöhung hängt von der Dosis, vom Geschlecht und in dem gewählten Modell auch vom Alter bei Bestrahlung ab. Daß die Faktoren der proportionalen Erhöhung bis ins hohe Alter persistieren, ist im Einklang mit den Beobachtungen für die als Erwachsene Bestrahlten. Bei den im Kindesalter oder im jugendlichen Alter Bestrahlten dagegen deutet sich in den Beobachtungen eine Verringerung der Faktoren mit zunehmender Zeit nach Bestrahlung an. Dieser Widerspruch zum Modell des relativen Risikos wird im nächsten Abschnitt erörtert.

Die Faktoren, um die sich die spontanen Mortalitätsraten erhöhen, sind - wie oben erläutert - eine Funktion der Dosis. Sie hängen jedoch auch vom Alter ab, und generell ergibt sich ein deutlicher Trend erhöhter Empfindlichkeit bei Bestrahlung in jüngerem Alter.



Skalierungsfaktoren

Alter bei Bestrahlung	< 20	20–35	> 35
Frauen	2,16	1,29	0,71
Männer	0,97	0,58	0,32

Abb.3. Dosisabhängigkeit des relativen und des absoluten Risikos der Krebssterblichkeit (ohne Leukämien) nach den neuen Analysen von RERF. Zum Vergleich sind die früheren Risikoabschätzungen von ICRP mit und ohne Reduktionsfaktor angegeben. Die ICRP-Schätzungen basieren auf den Daten bis zum Jahr 1975. Die Ergebnisse von RERF beziehen sich auf das gesamte Kollektiv der Atombomben-Überlebenden bis zum Jahr 1985. Skalierungsfaktoren für verschiedene Altersgruppen sind in der Tabelle angegeben.

Das wesentliche Resultat ist durch die obere Kurve in Abb.3 dargestellt. Diese Kurve zeigt die relativen Raten, d.h. die proportionalen Erhöhungen der Krebssterblichkeit für 6 Dosisgruppen. Da diese Daten alle Altersstufen und beide Geschlechter repräsentieren, sind in der beigefügten Tabelle zusätzliche Skalierungsfaktoren angegeben. Es fällt auf, daß die Faktoren für Frauen diejenigen für Männer um mehr als den Faktor 2 übertreffen. Dies bedeutet jedoch nicht, daß Frauen in gleichen Zeiträumen nach Bestrahlung mehr zusätzliche Krebserkrankungen als Männer erleiden. Bei Frauen ist die altersspezifische Inzidenz spontaner Krebserkrankungen in fortgeschrittenem Alter nur etwa

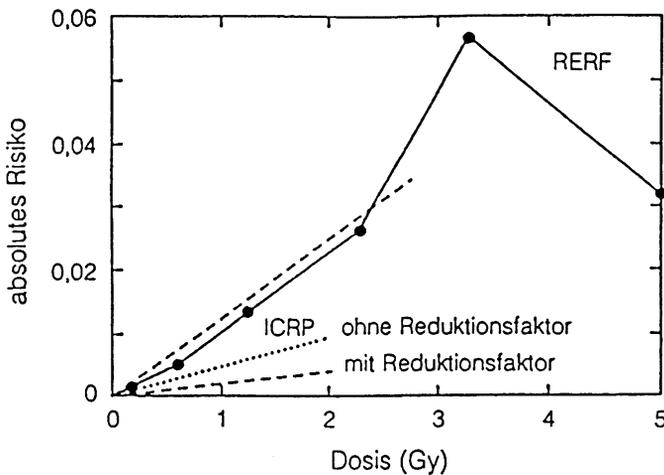
halb so hoch wie bei Männern. Insgesamt führt eine Bestrahlung bei beiden Geschlechtern daher ungefähr zu gleichen absoluten Erhöhungen der Krebsraten. Andererseits ergeben sich bei Summation über die gesamte Lebenszeit für Frauen dennoch mehr induzierte Krebstodesfälle, da Frauen wegen ihrer deutlich höheren Lebenserwartung dem Risiko, an Krebs zu erkranken, länger ausgesetzt sind.

Im Bereich der Dosen von mehr als 4 Gy, bei denen nur wenige überlebten, haben die errechneten Werte des relativen Risikos keine Bedeutung. Bei den hohen geschätzten Dosen muß eine starke Verfälschung dadurch auftreten, daß diejenigen mit höherer Wahrscheinlichkeit überlebten, deren tatsächliche Dosen geringer waren als aus ihrer Lokalisation während der Bombenexplosion geschätzt wird. Bedeutsam ist daher der Anfangsteil der errechneten Kurve. Dieser Anfangsteil entspricht einer Erhöhung der Krebsmortalität um etwa die Hälfte nach einer Dosis von 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung. Man spricht von einem relativen Risiko, das 1,5 beträgt, oder von einem relativen Zusatzrisiko von 0,5.

Von Interesse ist die Übersetzung des relativen in absolutes Risiko. Das absolute Risiko kann ausgedrückt werden durch die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, an Krebs zu sterben. Da im Durchschnitt der Bevölkerung Krebs für 20% aller Todesfälle verantwortlich ist - und dieser Wert gibt etwa die heutigen Gegebenheiten in den Industriestaaten wieder - so entspricht das relative Risiko von 1,5 durch 1 Gy einer Erhöhung auf 30%, d.h. das absolute Risiko für Krebsmortalität ist 0,1 pro Gy. Man spricht auch von einem Risikoeffizienten von 0,1/Gy.

Details zur Altersabhängigkeit des relativen und des absoluten Risikos werden im nächsten Abschnitt behandelt. Hier sei lediglich erwähnt, daß ICRP sich auf den Risikoeffizienten von etwa 0,1/Gy, als Mittelwert über beide Geschlechter und alle Altersstufen, stützt, jedoch zusätzlich einen Reduktionsfaktor von 2 für die Extrapolation zu kleinen Dosen annimmt. Dieser Extrapolationsfaktor basiert nicht auf den epidemiologischen Beobachtungen, sondern wird allein durch den Hinweis auf tierexperimentelle Untersuchungen begründet.

Die Erhöhung der Risikofaktoren gegenüber früheren Schätzungen ist weniger durch die Veränderungen der Dosimetrie bedingt, als durch die Tatsache, daß die neue Risikoschätzung die seit 1975 aufgetretenen zusätzlichen Krebstodesfälle und auch die Projektion in die Zukunft gemäß dem Modell des relativen Risikos einschließt. Ein zweiter Gesichtspunkt ist, daß bei den früheren Analysen die Dosisabhängigkeit für  $\gamma$ -Strahlung sigmoid erschien und damit der angenommene Reduktionsfaktor gerechtfertigt war, während er nunmehr hypothetisch ist.



Skalierungsfaktoren

Alter bei Bestrahlung	< 20	20-35	> 35
Frauen	0,57	0,63	0,88
Männer	1,01	1,46	1,45

Abb.4. Dosisabhängigkeit des absoluten Risikos der Leukämierestorlichkeit nach den neuen Analysen von RERF. Zum Vergleich sind die früheren Risikoabschätzungen von ICRP mit und ohne Reduktionsfaktor angegeben. Die ICRP-Schätzungen basieren auf den Daten bis zum Jahr 1975. Die Ergebnisse von RERF beziehen sich auf das gesamte Kollektiv der Atombomben-Überlebenden bis zum Jahr 1985. Skalierungsfaktoren für verschiedene Altersgruppen sind in der Tabelle angegeben.

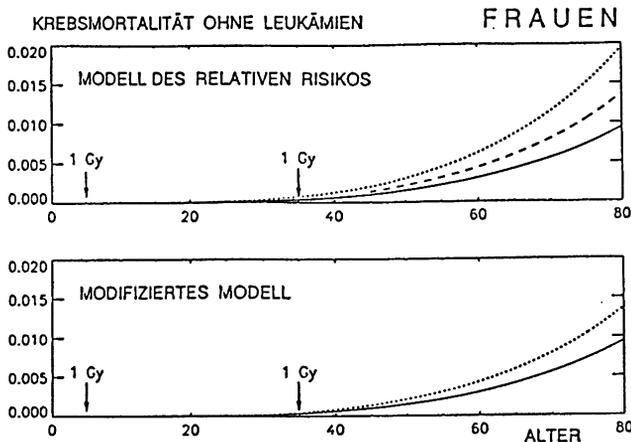
Auch für die Leukämien wurden neue Resultate erhalten. Die Situation ist hier einfacher, da seit 1975 nur wenige zusätzliche, der Bestrahlung zuzurechnende Fälle aufgetreten sind. Dennoch ergibt sich auch bezüglich der Leukämien eine Erhöhung der Risikoschätzungen um etwa den Faktor 2 (Abb.4). Dieser Faktor ist durch die Dosisrevision begründet. Wegen der verhältnismäßig oberflächennahen Verteilung des Knochenmarks im Körper, spielt für dieses Organ die höhere Transparenz des Körpers nach dem neuen Dosimetriesystem keine besondere Rolle. Es fehlt damit die gegenläufige Veränderung zu der im DS-86 errechneten erhöhten Abschirmung durch Häuser. Die geschätzten Knochenmarkdosen sind daher geringer als sie es nach dem früheren Dosimetriesystem waren; entsprechend höher sind die Risikoschätzungen. Insgesamt hat sich der relative Beitrag der Leukämierestorlichkeit im Vergleich zur gesamten Krebsmortalität nach den neuen Risikoschätzungen verringert. Die Leukämien tragen zwar nach den in die Zukunft extrapolierten Schätzungen nur etwa 10% zur strahleninduzierten Krebsmortalität bei, sind jedoch stärker zu bewerten, da sie früher nach Bestrahlung auftreten und daher einen größeren Verlust an Lebenserwartung bedingen.

#### 4. Ein verbessertes Modell zur Risikoprojektion.

Die Erörterungen des Risikos für Krebsmortalität ohne Leukämien in den neuen Empfehlungen von

ICRP sind unbefriedigend. Sie stützen sich auf den Vergleich des Modells des relativen Risikos mit dem einfachsten absoluten Risikomodell, das eine nach einer gewissen Latenzzeit konstante absolute Exzeßrate postuliert. Dieses letztere Modell ist jedoch unvereinbar mit den beobachteten Daten. Die Risikoschätzungen, die von ICRP für das absolute Risikomodell angegeben werden, sind andererseits unrealistisch hoch /13/. Der Vergleich des Modells des relativen Risikos mit einem ungeeigneten Modell führt zu keiner gültigen Aussage. Es ist stattdessen notwendig, nach anderen, sinnvollen Modellen zu fragen.

Im Modell des relativen Risikos, wie es in Abb.2 angedeutet ist, hängen die relativen Raten von der Dosis und vom Alter bei Strahlenexposition ab. Die Daten für die in jungem Alter Bestrahlten zeigen jedoch eine Abnahme der Proportionalitätsfaktoren mit zunehmender Zeit nach Bestrahlung. Ein modifiziertes Modell des relativen Risikos, bei dem die relativen Raten nicht vom Alter bei Bestrahlung, sondern vom erreichten Alter abhängen entspricht den Beobachtungen besser. Ein solches Modell wurde bereits früher für die Analyse der Lungenkrebshäufigkeit bei Uranbergleuten benutzt /14/.



**Abb.5.** Die altersspezifischen Krebsmortalitätsraten (ausgezogene Linien) und die erhöhten Raten nach einer Ganzkörperdosis von 1Gy im Alter von 5 und von 35 Jahren. Die Abhängigkeiten ergeben sich als maximum-likelihood Anpassung an die Daten (ohne Leukämien) aus Hiroshima und Nagasaki bis 1985. Das obere Diagramm zeigt das Resultat für die übliche Form des relativen Risikomodells, in dem die Faktoren der proportionalen Erhöhung der Krebsraten vom Alter bei Bestrahlung abhängen. Die untere Darstellung ergibt sich aus dem modifizierten Modell, in dem die Erhöhungen der altersspezifischen Raten vom jeweils erreichten Alter abhängen /13/. Das modifizierte Modell entspricht den Beobachtungen besser, da die absoluten Exzeßraten zwar mit der Zeit nach Bestrahlung zunehmen, die relativen Raten jedoch abnehmen.

Das Ergebnis ist durch die Diagramme in Abb.5 angedeutet /13/. Am Beispiel der weiblichen Atombomben-Überlebenden ist das konventionelle Modell des relativen Risikos dem modifizierten Modell gegenübergestellt. Für Strahlenexpositionen im Alter von 5 und von 35 Jahren sind die mit der maximum-likelihood Methode errechneten Exzeßraten über den alterspezifischen normalen Raten dargestellt. Für das konventionelle Modell ergeben sich zwei unterschiedliche Verläufe und ausgeprägte Zunahmen des absoluten Risikos für die Zeit nach Bestrahlung. Für das modifizierte Modell ergibt sich nur eine einzige Abhängigkeit - die allerdings nur nach einer auf die Exposition folgenden Latenzzeit von 10 Jahren zutrifft. Auch in diesem Modell steigen die absoluten Raten nach Bestrahlung, die Erhöhungen sind aber weniger ausgeprägt. Im Gegensatz zum konventionellen Modell, nehmen die relativen Raten in den Jahren nach der Strahlenexposition ab, und dies entspricht den Beobachtungen für die in jungem Alter exponierten Atombomben-Überlebenden.

Aus den errechneten Abhängigkeiten lassen sich die über die Lebenszeit integrierten Risiken der Krebsmortalität (ohne Leukämien) in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht errechnen. Die Resultate sind in Abb.6 dargestellt. Man erkennt, daß sich für höheres Alter bei Bestrahlung die errechneten Risiken in den beiden Modellen nicht unterscheiden. Man erhält andererseits

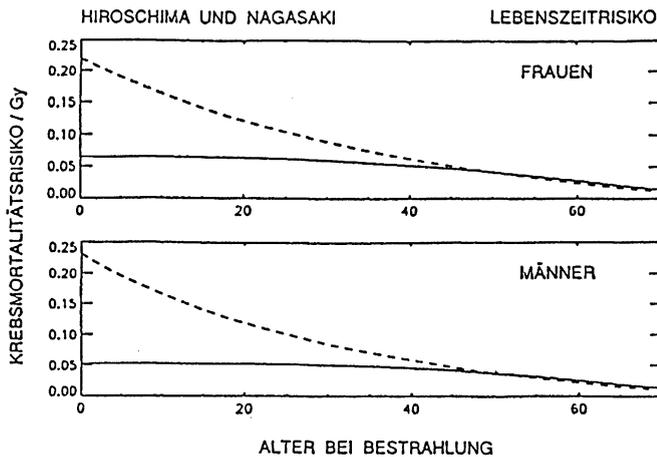
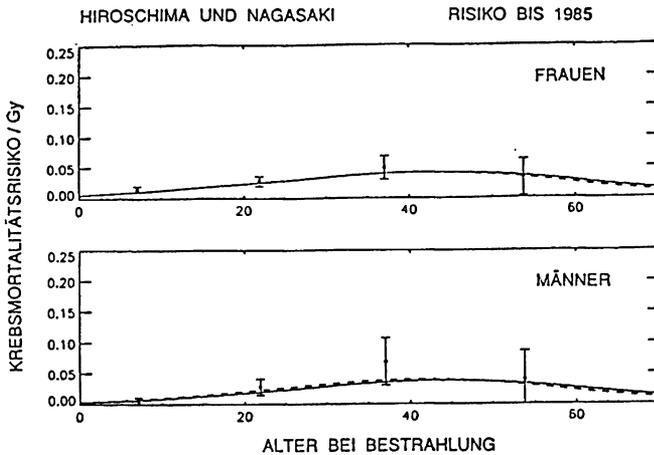


Abb.6. Das errechnete Lebenszeitrisiko für Krebssterblichkeit (ohne Leukämien) nach dem konventionellen Modell des relativen Risikos (gestrichelte Linien) und nach dem modifizierten Modell.

beträchtliche Unterschiede für Expositionen in jüngerem Alter. Der bisher angenommene, hypothetische Anstieg des Gesamtrisikos mit sich verringerndem Alter bei Bestrahlung wird durch das modifizierte Modell nicht vorausgesagt. Stattdessen erhält man bis zu einem Alter von etwa 40 Jahren bei Bestrahlung nahezu dasselbe Gesamtrisiko. Beide Modelle erreichen für die Gesamtheit der bisherigen Beobachtungen etwa die gleiche Güte der Anpassung, jedoch gibt nur das modifizierte Modell den Trend abnehmender Proportionalitätsfaktoren der in jungem Alter Bestrahlten wieder.

Die Übereinstimmung zweier so unterschiedlicher Modelle mit denselben beobachteten Daten mag überraschen. Sie erklärt sich dadurch, daß der Unterschied allein die Projektion in die Zukunft und



**Abb.7.** Die der Abbildung 6 entsprechenden Abhängigkeiten bei Beschränkung des Integrationszeitraumes auf die Zeit bis 1985. Die Punkte und die Standartabweichungen geben modellfrei gerechnete Exzessrisiken für diesen Zeitraum wieder /13/.

nicht den Zeitraum der bisherigen Beobachtungen betrifft. Dies ist in der Abb.7 dargestellt. Diese Abbildung gibt die errechneten integrierten Risiken für den Beobachtungszeitraum bis 1985 wieder. Dabei ergeben sich etwa die gleichen Abhängigkeiten für beide Modelle. Auch die modellfrei errechneten Exzessrisiken, die durch Punkte und ihre Standartabweichungen dargestellt sind, stimmen mit den von den Modellen abgeleiteten Abhängigkeiten überein. Die bemerkenswerte Folgerung aus der Abbildung ist, daß bisher für die im kindlichen und jugendlichen Alter bestrahlten Atombomben-Überlebenden nur ein geringer Teil des zu erwartenden Risikos verwirklicht wurde. Die zweite Folgerung ist, daß das übliche, auch den neuen Empfehlungen der ICRP zugrunde

liegende Modell in seiner Extrapolation in die Zukunft ganz hypothetisch ist. Das dem Trend der bisherigen Daten besser entsprechende modifizierte Modell führt zu geringeren Schätzungen. Dies läßt die Risikoschätzungen der ICRP als konservativer erscheinen als man früher annahm. Gibt man den hypothetischen und häufig kritisierten Reduktionsfaktor der ICRP auf, so kommt man mit dem modifizierten Extrapolationsmodell trotzdem zu denselben Risikoschätzungen.

## 5. Schlußfolgerung

Der hier gegebene Überblick bezieht sich auf einige wesentliche Aspekte der Beobachtungen an den Atombomben-Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki. Diese Beobachtungen sind das Resultat der größten epidemiologischen Studie, die jemals durchgeführt wurde. Die noch offenen Fragen zeigen, wie wichtig die Fortsetzung dieser Studie sein wird.

Die neuen Risikoschätzungen sind deutlich höher als frühere Annahmen, die sich auf die Beobachtungen bis zum Jahre 1975 stützten und keine Extrapolation in die Zukunft benutzten. Jedoch führt das übliche Modell des relativen Risikos möglicherweise zu stark überhöhter Extrapolation in die Zukunft. Das modifizierte Modell des relativen Risikos ergibt altersgemittelt - auch ohne die Annahme eines Reduktionsfaktors für kleine Dosen - Risikokoeffizienten von 0.04 /Gy und 0.05/Gy für Krebssterblichkeit (außer Leukämien) bei Männern und Frauen.

Die japanischen Daten sind zwar die wichtigste Basis unseres Wissens über die Dosis- und Altersabhängigkeit strahleninduzierter Malignome, sie müssen aber verglichen werden mit den Resultaten, die sich aus der Analyse anderer, Kollektive bestrahlter Personen ergeben. Die jüngste Analyse eines Komitees der US-Academy of Science gibt dazu einen besonders geeigneten Überblick /5/.

Die numerische Analyse der Strahlenrisiken und die versuchte Extrapolation zu kleinen Dosen ist auch in den Zusammenhang des Vergleiches mit anderen Risiken und insbesondere mit den Risiken chemischer Kanzerogene zu stellen. In dieser Aufgabe werden die Methoden und Modelle, die heute zur Analyse des Strahlenrisikos angewandt werden, eine weit breitere Anwendung finden.

## Literatur

- /1/ ICRP-60, 1991 *Annals of ICRP*, ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- /2/ Auxier, J.A., Cheka, J.S., Haywood, F.F., Jones, T.D., Thorngate, J.H. (1966). Free-field radiation-dose distributions from the Hiroshima and Nagasaki bombings. *Health Physics* 12: 425-429
- /3/ Sinclair, W.K. (1987). Risk, research, and radiation protection, *Radiat.Res.*112: 191.
- /4/ *Annals of the ICRP* (1977). Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford
- /5/ Rossi, H.H., Kellerer, A.M. (1974). The validity of risk estimates of leukemia incidence based on Japanese data. *Radiat.Res.*58: 131-140
- /6/ Kellerer, A.M., Rossi, H.H. (1972) The theory of dual radiation action. *Curr.Top.Radiat.Res.Q.* 8: 85-158
- /7/ Shellabarger, C.J., Chemelevsky, D., Kellerer, A.M. (1980) Induction of mammary neoplasms in the Sprague-Dawley rat by 430 keV neutrons and X-rays. *J.Natl.Cancer Inst.*64: 821-833
- /8/ Rossi, H.H., Mays, C.W. (1978). Leukemia risk from neutrons. *Health Phys.*34: 353-360
- /9/ US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. Final Report, Vol.1. Roesch WE (Ed.). Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima
- /10/ Preston, D.L., Pierce, D.A. (1988). The effect of changes in dosimetry on cancer mortality risk estimates in the atomic bomb survivors. *Radiat.Res.*114: 437-466
- /11/ Shimizu, Y., Kato, H., Schull, W.J. (1988). Life span study report 11, part 1. Cancer mortality in the years 1950-1985 based on the recently revised doses (DS86). Technical Report, RERF TR. Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima: 5-88
- /12/ Shimizu, Y, Kato, H., Schull, W.J., Preston, D.L., Fujita, S., Pierce, D.A. (1989). Studies of the mortality of A-Bomb-survivors 9. Mortality, 1950-1985: part 1. Comparison of risk coefficients of site-specific cancer mortality based on the DS86 and T65DR shielded kerma and organ doses. *Radiat.Res.*118: 502-524
- /13/ Kellerer, A.M., Barclay, D. (1991). Risk Projections Under Two Multiplicative Models for Cancer Mortality Among the Atomic Bomb Survivors (in Vorbereitung)
- /14/ National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR IV), 1988. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha Emitters. Washington: National Academy Press.
- /15/ National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR V), 1988. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Washington: National Academy Press.