

Aus der Klinik für Radioonkologie und Strahlentherapie,
Brachytherapie des Klinikums Ernst von Bergmann Potsdam -
Akademisches Lehrkrankenhaus der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Die Bedeutung des Unterschiedes zwischen den
angewandten Photonenenergien 6 MV und
18 MV bei der Bestrahlung von Blut am
Linearbeschleuniger
- Entwicklung einer klinisch praktikablen Lösung**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Katharina Frentzel
aus Berlin

Datum der Promotion: 25.06.2017

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt	1
Abstrakt (deutsch)	1
Abstract (english)	3
Eidesstattliche Versicherung und Anteilserklärung	4
Auszug aus der Journal Summary List (ISI Web of KnowledgeSM)	5
Druckexemplar der Originalpublikation	9
Lebenslauf	18
Publikationsliste	20
Dank	21

Abstrakt

Abstrakt (deutsch)

Einleitung: Die transfusionsassoziierte Graft-versus-Host-Reaktion (englisch: transfusion-associated graft-versus-host disease (TA-GVHD)) ist eine seltene, aber in 90% der Fälle tödlich verlaufende Komplikation bei der Bluttransfusion. Sie wird typischer Weise in immuninkompetenten Patienten beobachtet. Die bislang einzige Möglichkeit zur Vermeidung dieser TA-GVHD ist die Behandlung des Blutes mit ionisierender Strahlung.

Dieses Verfahren wird schon über viele Jahrzehnte weltweit angewendet. Auch die Verwendung von Röntgenstrahlung eines Linearbeschleunigers der Strahlentherapie ist eine akzeptierte Alternative zu den Gamma- oder Hochvoltbestrahlungsgeräten der Blutbanken. Dennoch bergen hochenergetische Röntgenstrahlen die potentielle Gefahr, durch den Kernphotoeffekt Radioaktivität im Blut selbst zu induzieren. Eine (Radio-)Aktivierung des Transfusionsblutes muss aber mit Blick auf den Empfänger des Blutes auf jeden Fall vermieden werden.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, zwei verschiedene Energien, 6 und 18 MV, die typischer Weise in der klinischen Routine verwendet werden, daraufhin zu untersuchen, ob sie in Transfusionsblut Radioaktivität induzieren und falls ja, in welcher Größenordnung. Weiterhin wurde im Rahmen dieser Arbeit ein klinisch praktikables Verfahren zu Blutbestrahlung am Linearbeschleuniger der Strahlentherapie entwickelt, das sicher das Auftreten von induzierter Radioaktivität ausschließt.

Methodik: Für diese Studie wurde ein Blutbeutelphantom hergestellt, das mit den Photonenenergien 6 und 18 MV bestrahlt wurde. Die induzierte Radioaktivität wurde in einem Bohrloch-Messsystem gemessen. Anschließend wurde der gleiche Bestrahlungs- und Messvorgang mit einer Einheit Erythrozytenkonzentrat durchgeführt. Unter Verwendung einer Plexiglas-Box und der Energie 6 MV wurde eine praktikable klinische Bestrahlungs-Prozedur entwickelt, die mit dem Bestrahlungsplanungssystem XiO für den Linearbeschleuniger Siemens ONCOR Anvant-Garde berechnet wurde.

Abstrakt

Ergebnisse: In beiden durchgeführten Messanordnungen (Blutbeutelphantom und Erythrozytenkonzentrat) ließ sich induzierte Radioaktivität für 18 MV nachweisen - nicht jedoch für 6 MV. Die gemessene Radioaktivität bei 18 MV betrug das bis zu 190-fache des Null-effektes. Dieses Ergebnis ist signifikant und von hoher klinischer Relevanz, denn es handelt sich bei den Empfängern des Blutes auch um Feten und Neugeborene, für die jede Strahlenexposition zu vermeiden ist.

Schlussfolgerung: Die Bestrahlung von Blut mit Röntgenstrahlung eines Linearbeschleunigers der Strahlentherapie ist eine sichere und praktikable Methode. Um aber induzierte Radioaktivität in zu transfundierendem Blut sicher auszuschließen, wird die Verwendung der Photonenenergie 6 MV oder kleiner empfohlen.

Abstract (english)

Introduction: The transfusion-associated graft-versus-host disease (TA-GVHD) is a rare but fatal complication of blood transfusion. It is typically observed in immunosuppressive patients. To prevent a TA-GVHD it is recommended to irradiate transfusion blood and blood components with ionizing radiation.

This treatment has been practiced for decades all over the world. Furthermore, using x-rays from a linear accelerator of the radiotherapy department is an accepted alternative to gamma and orthovoltage irradiation devices of the blood banks. However, the use of high energy x-rays may carry a potential risk to induce radioactivity in the blood itself. This effect must be avoided with regard to the recipient of the transfusion blood.

Hence, the objective of this study was to investigate the effect of two different energy levels, 6 and 18 MV, which are executed in routine clinical settings. The research question was if induced radioactivity occurs at one of these standard energy levels. Additionally, if induced radioactivity occurs it was the aim to determine its magnitude. The objective of the second part of this work was to give a proposal for a feasible clinical blood irradiation procedure that certainly avoids induced radioactivity.

Methods: For this study a blood bag phantom was developed, irradiated with x-ray energies of 6 MV and 18 MV, and the induced radioactivity was measured in a well counter. Thereafter, the same irradiation and measuring procedure was performed with a unit of packed red blood cells (RBCs). A feasible clinical procedure was developed using an acrylic box and applying 6 MV photons. With the irradiation planning system XiO an irradiation protocol was generated for the linear accelerator Siemens ONCOR Anvant-Garde.

Results: Both measurement setups (blood bag phantom and packed RBCs) showed that there was induced radioactivity for 18 MV - but not for 6 MV. The induced radioactivity for 18 MV was up to 190 times the background. This is significant and of clinical relevance especially since there are newborn and fetal blood recipients for whom every radiation exposure has to be strictly avoided.

Conclusions: The irradiation of blood with x-rays from a linear accelerator of the radiotherapy department is safe and feasible, but it is recommend to use an x-ray energy of 6 MV or less to avoid induced radioactivity in transfusion blood.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Katharina Frentzel, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema „*Die Bedeutung des Unterschiedes zwischen den angewandten Photonenenergien 6 MV und 18 MV bei der Bestrahlung von Blut am Linearbeschleuniger - Entwicklung einer klinisch praktikablen Lösung*“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Mein Anteil an der ausgewählten Publikation entspricht dem, der in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben ist.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Ausführliche Anteilserklärung an der erfolgten Publikation

Publikation: Katharina Frentzel und Harun Badakhshi, *Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV*, Medical Physics, 43 (12), 2016

Beitrag im Einzelnen (bitte **ausführlich** ausführen):

Ich, Katharina Frentzel, entwickelte die Fragestellung und das Konzept der o.g. Arbeit und führte alle notwendigen Messungen, Berechnungen und Dokumentationen selbstständig durch. Ich wertete die Messungen aus und bewertete und interpretierte die Ergebnisse. Ich schieb das Manuskript selbstständig und reichte es zur Veröffentlichung bei *Medical Physics* ein.

Mein Betreuer, Priv.-Doz. Dr. Harun Badakhshi, half bei konzeptionellen Überlegungen und diskutierte mit mir das Manuskript.

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin

Auszug aus der Journal Summary List (ISI Web of KnowledgeSM)

Das US-amerikanische Journal „*Medical Physics*“ ist das international führende Journal zum Thema medizinische Physik mit einem **Impact Factor von 2,496** und einem **Eigenfactor von 0,04087**.

ISI Web of KnowledgeSM

Journal Citation Reports[®]

[WELCOME](#) [? HELP](#)

2015 JCR Science Edition

Journal Summary List

[Journal Title Changes](#)

Journals from: **subject categories RADIOLOGY, NUCLEAR MEDICINE & MEDICAL IMAGING** [VIEW CATEGORY SUMMARY LIST](#)

Sorted by:

Journals 1 - 20 (of 124)

« « « [1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7] » » »

Page 1 of 7

Ranking is based on your journal and sort selections.

Mark	Rank	Abbreviated Journal Title <i>(linked to journal information)</i>	ISSN	JCR Data ⁱ						Eigenfactor [®] Metrics ⁱ	
				Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Articles	Cited Half-life	Eigenfactor [®] Score	Article Influence [®] Score
<input type="checkbox"/>	1	JACC-CARDIOVASC IMAG	1936-878X	5248	7.815	7.359	2.458	96	4.1	0.02352	2.985
<input type="checkbox"/>	2	RADIOLOGY	0033-8419	48521	6.798	7.326	1.559	354	>10.0	0.07237	2.532
<input type="checkbox"/>	3	J NUCL MED	0161-5505	22728	5.849	5.795	1.147	299	7.8	0.03868	1.849
<input type="checkbox"/>	4	CIRC-CARDIOVASC IMAG	1941-9651	3562	5.771	6.358	1.395	76	3.7	0.01857	2.681
<input type="checkbox"/>	5	J CARDIOVASC MAGN R	1097-6647	3592	5.752	5.437	0.518	114	4.0	0.01198	1.764
<input type="checkbox"/>	6	EUR J NUCL MED MOL I	1619-7070	11996	5.537	5.145	1.432	190	6.2	0.02619	1.602
<input type="checkbox"/>	7	NEUROIMAGE	1053-8119	79475	5.463	6.797	1.160	770	6.7	0.17977	2.321
<input type="checkbox"/>	8	HUM BRAIN MAPP	1065-9471	17184	4.962	5.638	0.931	378	6.5	0.04035	2.084
<input type="checkbox"/>	9	INVEST RADIOL	0020-9996	6024	4.887	4.928	1.444	108	6.7	0.01191	1.497
<input type="checkbox"/>	10	RADIOTHER ONCOL	0167-8140	14095	4.817	4.789	0.970	301	5.9	0.03288	1.517
<input type="checkbox"/>	11	MED IMAGE ANAL	1361-8415	4764	4.565	4.950	0.760	121	6.3	0.01069	1.622
<input type="checkbox"/>	12	INT J RADIAT ONCOL	0360-3016	39558	4.495	4.379	1.232	370	8.1	0.06930	1.404
<input type="checkbox"/>	13	ULTRASCHALL MED	0172-4614	1866	4.434	4.081	1.123	57	4.1	0.00429	0.954
<input type="checkbox"/>	14	CLIN NUCL MED	0363-9762	3463	4.278	3.430	0.558	163	4.9	0.00627	0.788
<input type="checkbox"/>	15	ULTRASOUND OBST GYN	0960-7692	9842	4.254	3.693	1.860	186	7.3	0.01749	1.157
<input type="checkbox"/>	16	MAGN RESON MED	0740-3194	28628	3.782	3.899	0.847	438	>10.0	0.03874	1.254
<input type="checkbox"/>	17	IEEE T MED IMAGING	0278-0062	13784	3.756	4.720	0.779	213	9.5	0.02443	1.779
<input type="checkbox"/>	18	EUR RADIOL	0938-7994	14583	3.640	3.934	0.737	422	6.1	0.03479	1.318
<input type="checkbox"/>	19	SEMIN RADIAT ONCOL	1053-4296	2013	3.556	4.080	1.444	36	7.9	0.00390	1.483
<input type="checkbox"/>	20	INT J HYPERTHER	0265-6736	2517	3.361	2.802	0.694	98	6.8	0.00377	0.635

Journals 1 - 20 (of 124)

« « « [1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7] » » »

Page 1 of 7

ISI Web of KnowledgeSM

Journal Citation Reports[®]

[WELCOME](#) [? HELP](#)

2015 JCR Science Edition

Journal Summary List

[Journal Title Changes](#)

Journals from: **subject categories RADIOLOGY, NUCLEAR MEDICINE & MEDICAL IMAGING**

[VIEW CATEGORY SUMMARY LIST](#)

Sorted by: [SORT AGAIN](#)

Journals 21 - 40 (of 124)

◀◀◀ [1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7] ▶▶▶

Page 2 of 7

[MARK ALL](#) [UPDATE MARKED LIST](#)

Ranking is based on your journal and sort selections.

Mark	Rank	Abbreviated Journal Title <i>(linked to journal information)</i>	ISSN	JCR Data ⁱ						Eigenfactor [®] Metrics ⁱ	
				Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Articles	Cited Half-life	Eigenfactor [®] Score	Article Influence [®] Score
<input type="checkbox"/>	21	BIOMED OPT EXPRESS	2156-7085	4669	3.344	3.383	0.655	414	3.1	0.01949	0.995
<input type="checkbox"/>	22	CONTRAST MEDIA MOL I	1555-4309	1199	3.286	3.098	0.591	44	4.3	0.00293	0.759
<input type="checkbox"/>	23	J MAGN RESON IMAGING	1053-1807	14860	3.250	3.449	0.672	384	6.9	0.03190	1.190
<input type="checkbox"/>	24	AM J NEURORADIOL	0195-6108	20164	3.124	3.595	0.574	357	8.5	0.03243	1.178
<input type="checkbox"/>	25	RADIAT RES	0033-7587	8727	3.022	3.072	0.567	127	>10.0	0.01143	0.986
<input type="checkbox"/>	26	NMR BIOMED	0952-3480	5917	2.983	3.372	0.486	181	6.8	0.01483	1.259
<input type="checkbox"/>	27	J AM COLL RADIOL	1546-1440	2201	2.929	2.599	0.860	129	4.2	0.00723	0.867
<input type="checkbox"/>	27	J NUCL CARDIOL	1071-3581	2495	2.929	2.508	0.791	91	5.8	0.00510	0.694
<input type="checkbox"/>	29	STRAHLENTHER ONKOL	0179-7158	2639	2.898	2.355	0.627	102	5.2	0.00501	0.560
<input type="checkbox"/>	30	CLIN NEURORADIOL	1869-1439	323	2.887	2.327	0.417	60	2.7	0.00115	0.712
<input type="checkbox"/>	31	SEMIN NUCL MED	0001-2998	1857	2.850	3.112	1.244	41	8.2	0.00310	1.047
<input type="checkbox"/>	32	PHYS MED BIOL	0031-9155	21090	2.811	3.051	0.542	555	7.5	0.03978	1.011
<input type="checkbox"/>	33	J NEURORADIOLOGY	0150-9861	790	2.759	1.780	0.825	40	5.9	0.00134	0.434
<input type="checkbox"/>	34	AM J ROENTGENOL	0361-803X	30030	2.660	3.154	0.507	513	9.6	0.04046	0.975
<input type="checkbox"/>	35	MAGN RESON MATER PHY	0968-5243	1291	2.638	2.568	0.127	55	6.8	0.00331	0.965
<input type="checkbox"/>	36	EUR J RADIOL	0720-048X	10453	2.593	2.518	0.351	370	4.7	0.02999	0.782
<input type="checkbox"/>	37	J VASC INTERV RADIOL	1051-0443	7398	2.570	2.538	0.429	217	7.2	0.01300	0.731
<input type="checkbox"/>	38	MOL IMAGING BIOL	1536-1632	1879	2.569	2.467	0.897	97	4.5	0.00601	0.821
<input type="checkbox"/>	39	J BIOMED OPT	1083-3668	11296	2.556	2.603	0.429	464	5.2	0.02575	0.698
<input type="checkbox"/>	40	RADIOGRAPHICS	0271-5333	8820	2.523	3.464	0.481	133	9.5	0.00979	1.029

[MARK ALL](#) [UPDATE MARKED LIST](#)

Journals 21 - 40 (of 124)

◀◀◀ [1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7] ▶▶▶

Page 2 of 7

ISI Web of KnowledgeSM

Journal Citation Reports[®]

WELCOME ? HELP

2015 JCR Science Edition

Journal Summary List

Journal Title Changes

Journals from: subject categories RADIOLOGY, NUCLEAR MEDICINE & MEDICAL IMAGING

VIEW CATEGORY SUMMARY LIST

Sorted by: Impact Factor SORT AGAIN

Journals 41 - 60 (of 124)

Navigation icons: back, forward, search, etc.

Page 3 of 7

MARK ALL UPDATE MARKED LIST

Ranking is based on your journal and sort selections.

Mark	Rank	Abbreviated Journal Title <i>(linked to journal information)</i>	ISSN	JCR Data ⁱ						Eigenfactor [®] Metrics ⁱ	
				Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Articles	Cited Half-life	Eigenfactor [®] Score	Article Influence [®] Score
<input checked="" type="checkbox"/>	41	MED PHYS	0094-2405	21399	2.496	2.889	0.387	602	6.8	0.04087	0.846
<input type="checkbox"/>	42	J CARDIOVASC COMPUT	1934-5925	1061	2.472	2.833	0.367	79	4.2	0.00379	0.911
<input type="checkbox"/>	43	RADIAT ONCOL	1748-717X	3642	2.466	2.768	0.335	263	3.4	0.01406	0.835
<input type="checkbox"/>	44	NUCL MED BIOL	0969-8051	3740	2.429	2.299	0.727	132	7.4	0.00595	0.615
<input type="checkbox"/>	45	Q J NUCL MED MOL IM	1824-4785	962	2.413	1.825	0.385	39	6.3	0.00211	0.580
<input type="checkbox"/>	46	ULTRASOUND MED BIOL	0301-5629	9032	2.298	2.554	0.544	316	8.2	0.01292	0.699
<input type="checkbox"/>	47	NEURORADIOLOGY	0028-3940	4920	2.274	2.459	0.464	125	9.0	0.00844	0.863
<input type="checkbox"/>	48	MOL IMAGING	1535-3508	1106	2.216	2.554	0.019	52	5.9	0.00263	0.785
<input type="checkbox"/>	49	ABDOM IMAGING	0942-8925	2929	2.189	2.019	0.377	318	6.5	0.00490	0.518
<input type="checkbox"/>	50	CLIN RADIOL	0009-9260	5239	2.151	2.081	0.311	177	8.0	0.00893	0.632
<input type="checkbox"/>	51	CARDIOVASC INTER RAD	0174-1551	4417	2.144	2.134	0.525	217	5.7	0.00904	0.567
<input type="checkbox"/>	52	ULTRASONIC IMAGING	0161-7346	967	2.111	1.874	0.500	24	>10.0	0.00075	0.567
<input type="checkbox"/>	53	BRACHYTHERAPY	1538-4721	1202	2.088	2.087	0.528	127	3.6	0.00279	0.474
<input type="checkbox"/>	54	Z MED PHYS	0939-3889	348	2.085	1.739	0.382	34	3.6	0.00128	0.611
<input type="checkbox"/>	55	ACTA RADIOL	0284-1851	3839	2.009	1.758	0.442	197	7.7	0.00700	0.544
<input type="checkbox"/>	56	MAGN RESON IMAGING	0730-725X	6037	1.980	2.327	0.358	162	8.4	0.01113	0.824
<input type="checkbox"/>	57	ACAD RADIOL	1076-6332	4298	1.966	1.945	0.538	195	6.5	0.00976	0.661
<input type="checkbox"/>	58	ULTRASONICS	0041-624X	4982	1.954	2.059	0.667	237	9.3	0.00700	0.568
<input type="checkbox"/>	59	RADIAT ENVIRON BIOPH	0301-634X	1359	1.923	1.784	0.435	46	7.9	0.00268	0.625
<input type="checkbox"/>	60	DENTOMAXILLOFAC RAD	0250-832X	2072	1.919	1.859	0.440	75	7.3	0.00352	0.528

MARK ALL UPDATE MARKED LIST

Journals 41 - 60 (of 124)

Navigation icons: back, forward, search, etc.

Page 3 of 7

Druckexemplar der Originalpublikation

Titel: Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV

Erstautorin: Katharina Frentzel

Zweitautor: Harun Badakhshi

Journal: Medical Physics (Med. Phys.)

Volume: 43

Issue: 12

Datum der Veröffentlichung: 15. November 2016

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV. *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV. *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Die Volltext-Version des Artikels darf aus lizenzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht werden.

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

URL: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4967482>

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Publikationsliste

J. Kierfeld, K. Frentzel, P. Kraikivski und R. Lipowsky. **Active dynamics of filaments in motility assays.** *Eur Phys J. Special Topics*, 157:123-133, 2008.

Impact Factor: 1,27

K. Frentzel und H. Badakhshi. **Irradiation with x-rays of the energy 18 MV induces radioactivity in transfusion blood: proposal of a safe method using 6 MV.** *Med Phys*, 43 (12), 2016.

Impact Factor: 2,496

Dank

Viele Menschen haben mich unterstützt damit diese Arbeit entstehen konnte. Ihnen möchte ich von ganzem Herzen danken. Allen voran meinem Betreuer, Priv.-Doz. Dr. med. Harun Badakhshi, Chefarzt der *Klinik für Strahlentherapie, Klinikum Ernst von Bergmann, Potsdam*, für seine motivierende und humorvolle Art in vielen sehr effektiven Diskussionen.

Prof. Dr. Ingo Brink und Dipl.-Phys. Gerd Lück stellten mir freundlicher Weise das Bohrloch-Messsystem und die Aktivimeter der *Klinik für Nuklearmedizin, Klinikum Ernst von Bergmann, Potsdam* für die Aktivitätsmessungen in dieser Arbeit zur Verfügung. Gerd Lück gilt mein besonderer Dank für seine Kollegialität und die freundliche Einarbeitung in die Bedienung der Messgeräte.

Vielen Dank an Dr. Ulrich Jahn von der *Charité Berlin* und an Dipl.-Med. Udo Umhauer vom *Institut für Transfusionsmedizin, Potsdam* für die Unterstützung beim Bau der Plexiglas-Box und des Blutbeutel-Phantoms.

Bei der Überarbeitung des Manuskripts unterstützten mich mein Mann, Hendrik Frentzel, und meine Freundinnen, Julia Kress und Molly O'Connor. Vielen, vielen Dank dafür!

Frau Gabriele Vössing trug die Problematik der Photonenenergie bei der Blutbestrahlung erstmals an mich heran. Herzlichen Dank für die vielen ermutigenden Gespräche. Lieben Dank auch an meine Kollegen Dr. Franziska Winkelmann und Dr. Holger Stahl aus der *Klinik für Strahlentherapie, Klinikum Ernst von Bergmann, Potsdam*. Ihre Unterstützung motivierte mich und half mir, bei manchem Gegenwind weiter zu machen.

Der allergrößte Dank aber gilt meiner Familie, meinem Mann und meinen beiden Söhnen, die mir täglich Kraft und Mut geben. Und auch meinen Schwiegereltern - ohne Eure Unterstützung wäre das alles nicht möglich gewesen.