

Aus der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin
der Universität Würzburg

Direktor: Prof. Dr. med. Andreas K. Buck

Beta-Strahlenexposition der Finger bei der Radiosynoviorthese

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der

Medizinischen Fakultät

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Sabrina Neumann

aus **München**

Würzburg, **Dezember** 2015

Referent: Prof. Dr. Peter Schneider

Korreferent: Prof. Dr. Andre Steinert

Dekan: Prof. Dr. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 22.09.2017

Die Promovendin ist Zahnärztin

Verzeichnis der Abkürzungen

^{169}Er	Erbium-169
^{169}Tm	Thulium-169
^{186}W	Wolfram-186
^{186}Os	Osmium-186
^{186}Re	Rhenium-186
^{90}Y	Yttrium-90
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	Technetium
Abb.	Abbildung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
cm	Zentimeter
et al.	et alli = und andere
ggf.	gegebenenfalls
m	Meter
MBq	Megabecquerel
MeV	Megaelektronenvolt
MRT	Magnetresonanztomographie
mSv	Millisivert
MTA	medizinisch technische Assistenz
n	Anzahl
NSAR	nicht steroidale Antirheumatika
RSO	Radiosynoviorthese
Sv	Sievert
Tab.	Tabelle
TLD	Thermolumineszenzdetektor
UKW	Universitätsklinikum Würzburg
z.B.	zum Beispiel
β	Beta
γ	Gamma
μ	Mikro
μl	Mikroliter

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Die Radiosynoviorthese	3
2.1 Einführung.....	3
2.1.1 Indikationen.....	3
2.1.2 Kontraindikationen.....	4
2.1.3 Relative Kontraindikationen.....	4
2.2 Wirkungsweise.....	5
2.3 Ziele der Radiosynoviorthese.....	5
2.4 Diagnostik und Indikationsstellung.....	6
2.5 Verwendete Radioisotope.....	7
2.5.1 Yttrium-90.....	8
2.5.2 Rhenium-186.....	8
2.5.3 Erbium-169.....	9
2.6 Strahlenwirkung.....	10
2.6.1 Deterministische Strahlenwirkung.....	12
2.6.2 Stochastische Strahlenwirkung.....	12
3. Methodik	14
3.1 Gesetzliche Vorgaben.....	14
3.2 Fingerringdosimeter.....	16
3.3 RSO-Durchführung.....	18
4. Ergebnisse	21
4.1 Retrospektive Datenerhebung.....	21
4.2 Datensammlung.....	22
4.3 Ergebnisse.....	25
4.4 Strahlenbelastung des Personals.....	26
5. Diskussion	27
6. Zusammenfassung	34
7. Literaturverzeichnis	35
8. Abbildungsverzeichnis	39
9. Tabellenverzeichnis	40
10. Anhang	41

1. Einleitung

Die Radiosynoviorthese (RSO) wird nun seit mehr als 50 Jahren in dafür speziell eingerichteten Fachkliniken praktiziert.

Als RSO wird die intraartikuläre Injektion von geeigneten Beta-Strahlern zur Behandlung von entzündlich veränderter Synovialschleimhaut bei chronischen Gelenkerkrankungen bezeichnet. Der Begriff „Radiosynoviorthese“ wurde von Delbarre et al. (1968) geprägt und bedeutet die Wiederherstellung von entzündlich veränderter Synovialschleimhaut mittels Radiopharmaka.

Für die RSO werden in Deutschland die dafür zulässigen β -Strahler Erbium-169 (^{169}Er), Rhenium-186 (^{186}Re) sowie Yttrium-90 (^{90}Y) verwendet.

Welches der Radioisotope zum Einsatz kommt, ist von dem zu behandelnden Gelenk abhängig (Fischer M. et al., 2002).

Durch den vermehrten Gebrauch von ^{90}Y in der Therapie von Synovialitiden, die zum größten Teil das Kniegelenk betreffen, hat sich die Strahlenbelastung des beteiligten Personals um ein Vielfaches erhöht.

Das Radioisotop ^{90}Y ist für 60% der Strahlenbelastung verantwortlich (Rimpler A. et al., 2007).

Liepe et al. veröffentlichte (2003) eine Studie zur „Beta-Ortsdosimetrie der Fingerkuppen bei Radiosynoviorthese“, die bedenkliche Werte der Hautdosis bei Therapeuten sowie bei medizinischen Fachangestellten aufzeigt. Das Personal kommt durch die Handhabung, wie das Abfüllen der radioaktiven Stoffe, Anreichen der präparierten Spritzen und Applikation des Radiopharmakons in unmittelbaren und unvermeidbaren Kontakt mit dem Radionuklid.

Die höchsten Dosiswerte wurden an Daumen und Zeigefinger der nicht dominanten Hand gemessen (Rimpler A. et al., 2007 / Liepe K. et al., 2003).

Als Jahresgrenzwert für medizinisches Fachpersonal im radiologisch tätigen Bereich gelten nach der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) Hautdosiswerte von (500 mSv).

Durch die von Liepe et al. (2003) durchgeführte Studie zur Aufzeichnung der Strahlenbelastung $H_p(0,07)$, wurde das Tragen von Thermolumineszenzdetektoren (TLD), an den Fingergelenken, während der Vorbereitung und Durchführung der RSO unabdingbar. Eine monatliche Auswertung der TLD's zur Dokumentation der Strahlenbelastung wird in dafür vorgesehenen Einrichtungen wie dem „Helmholtz Zentrum München“, vorgenommen.

Aufgrund der bedenklichen Dosiswerte und die damit verbundene Gefährdung des Personals, im therapeutischen sowie assistierenden Bereich, etablierten sich verschiedene Verfahren, um die Strahlenbelastung zu minimieren.

Die geübte und verfeinerte Handhabung lässt die Hautdosis weit unter den Grenzbereich für strahlenexponiertes Personal im Jahr (500 mSv/Jahr) sinken.

Das Applikationsverfahren ändert nichts an den Therapieergebnissen für den Patienten, stellt jedoch eine Verringerung der Strahlenbelastung für die Mitwirkenden dar.

Die Aufzeichnungen erfolgten bei 350 Patienten mit insgesamt 540 bestrahlten Gelenken innerhalb von drei aufeinander folgenden Jahren.

Ziel dieser Arbeit ist es die Effektivität der in Würzburg angewandten Behandlungsmethodik und die dadurch verringerte Strahlenbelastung des medizinisch involvierten Personals aufzuzeigen.

2. Die Radiosynoviorthese

2.1 Einführung

Die Radiosynoviorthese etablierte sich in der Behandlung chronisch entzündlicher Gelenkerkrankungen als ein bedeutsames Therapieverfahren. Insbesondere im ambulanten Sektor erlangte sie in den vergangenen Jahren an Signifikanz.

Bei älteren sowie auch bei jüngeren Patienten wird sie vermehrt zur Therapie von entzündlichen und degenerativen Gelenkerkrankungen eingesetzt. Kinder und Jugendliche sollten nur unter einer strengen Indikationsstellung behandelt werden.

Die Patienten mit einer Synovialitis leiden unter Schmerzen, Schwellung, Gelenksteifheit und daraus resultierender Funktionseinschränkung (*Franke C. 2000 / Fischer M. et al., 2002*). Patienten mit der erblichen Blutgerinnungsstörung Hämophilie und entsprechender Arthropathie stellen ein wichtiges Patientenkontingent der RSO dar. Bei diesen Patienten entwickelt sich durch Resorption und Abbau des freien Blutes aus der Gelenkhöhle eine reaktive Synovialitis (*Hovy L. 1999*).

Die RSO wird insbesondere dann angewendet, wenn die konventionellen Maßnahmen wie medikamentöse Behandlungsversuche keine Besserung erzielen. Gelenke die nach sechs Monaten auf Corticosteroid Injektionen keine positive Veränderung zeigen, werden für die RSO ausgewählt (*Mödder G. 2008*).

2.1.1 Indikationen

Die Synovialitis ist die Hauptindikation der RSO, wodurch das Therapieverfahren einen hohen Stellenwert in der Orthopädie sowie Rheumatologie erlangt hat.

Eine RSO ist erst dann angezeigt, wenn die antirheumatische Therapie erfolglos ist und innerhalb des darauffolgenden halben Jahres keine Besserung erzielt wird. Zur Basistherapie zählen Methotrexat (MTX), das die Proliferation der Zellen hemmen soll sowie nicht-steroidale-Antirheumatika (NSAR) zur analgetischen und Corticosteroid- Injektionen zur antiphlogistischen Therapie (*Franke C. 2000 / Mödder G. 2008*).

Primär entzündliche Gelenkerkrankungen:

- chronische Polyarthritis
- Psoriasisarthritis
- Gelenkbeteiligung bei Morbus Bechterew
- villonoduläre Synovialitis
- postoperative Synovialitis
- Hämophilie

Primär degenerative Gelenkerkrankungen:

- aktivierte Gonarthrose
- aktivierte Omarthrose
- aktivierte Fingerpolyarthrose
- aktivierte Rhizarthrose
- Reizzustand nach Knie-TEP-Implantation

(Farahati J. et al., 1999 / Gratz S. et al., 2002)

Die primär entzündlichen Gelenkerkrankungen zeigen eine bessere Erfolgsquote als die primär degenerativen Gelenkerkrankungen *(Franke C. 2000 / Schneider P. 2005 / Mödder G. 2008)*.

2.1.2 Kontraindikationen

- Schwangerschaft
- Stillen
- eine rupturierte Baker Zyste
- lokale Hautinfektionen
- Infektionen des Gelenkes
- ausgeprägte Haemarthrose

(Fischer M. et al., 2002 / Schneider P., 2005)

2.1.3 Relative Kontraindikationen

- Patienten < 20 Jahren
- Knochendestruktionen mit Gelenkinstabilität
- ein erhöhtes Blutungsrisiko

(Farahati J. et al., 1999)

2.2 Wirkungsweise

Die RSO dient der Wiederherstellung der Gelenkschleimhaut. In der Frühphase werden die entzündlichen Prozesse der Gelenkentzündung gehemmt und in der Spätphase das Fortschreiten des destruktiven Prozesses (*Gratz S. et al., 2002*).

Es werden nur Beta-minus Korpuskularstrahler, wie zum Beispiel Yttrium-Zitrat, Rhenium-Sulfid und Erbium-Zitrat verwendet (*Mödder G. 2008*).

Aufgrund ihrer Bindung an wasserunlösliche Kolloide verbleiben die Radionuklide zunächst im Gelenkbinnenraum, wo sie innerhalb kurzer Zeit von Synovialzellen phagozytiert werden. Infolgedessen fibrosiert und sklerosiert die Synovialis.

Durch die interne Bestrahlung reduziert sich die lokale Hyperämie und die entzündlich infiltrierten Synovialzotten bilden sich durch die Nekrose entzündlicher Zellen zurück.

Dies hat eine Regeneration der Synovialmembran zur Folge (*Mödder G. 2008 / Gratz S. et al., 2002*).

Die dabei verwendeten Beta-Strahler haben nur eine begrenzte Eindringtiefe, das heißt, dass sich insbesondere bei der Therapie von Kniegelenken Limitationen ergeben können. Deshalb werden häufig kombinierte Therapieverfahren mit einer arthroskopisch durchgeführten Synovektomie, praktiziert.

Positiv ist, dass durch die geringe Eindringtiefe die unter der Synovialis liegende Knorpelstruktur erhalten und so eine Sklerosierung der Gefäße und des Gelenkknorpels gering bleibt (*Franke C. 2000 / Gratz S. et al., 2000*).

Die Erfolgsquote ist besonders hoch, wenn noch keine Gelenkdestruktionen aufgetreten sind. Bei Patienten mit Gelenkzerfall tritt dennoch nach RSO meist eine Beschwerdeerleichterung auf (*Franke C. 2000*).

RSO kann nach mindestens sechs Monaten wiederholt werden, wobei dasselbe Gelenk mit einer höheren Dosis therapiert werden sollte (*Fischer M. et al., 2002*).

2.3 Ziele der Radiosynoviorthese

Da es sich um eine systemische Erkrankung handelt, ist der Einsatz von Medikamenten unverzichtbar. Gemeinsame Ziele sind, dass beim Versagen der systemischen Therapie durch die Radiosynoviorthese der lokale Gelenkbefall im Gegensatz zur systemischen Erkrankung in seinem Fortschreiten unterbrochen oder wenigstens verlangsamt wird. An oberster Stelle steht die Schmerzreduktion, Herstellung der Beweglichkeit und somit die Verbesserung der Lebensqualität des Patienten.

2.4 Diagnostik und Indikationsstellung

Patienten, die für die RSO ausgewählt werden, müssen zur Einschätzung des Schweregrades bei den Voruntersuchungen mittels unterschiedlicher bildgebender Verfahren untersucht werden. Dazu zählen die Szintigrafie, Arthrosonographie, Magnetresonanztomographie (MRT) sowie die konventionelle Radiologie.

Der Degenerationsprozess sowie die Inflammation der Gelenkschleimhaut lassen sich bei der Szintigrafie mittels des radioaktiven Markers ^{99m}Tc -Methylen-diphosphonat darstellen.

^{99m}Tc ist schwach radioaktiv und hat nur eine Halbwertszeit von sechs Stunden. Durch die Verwendung dieses Markers können Stoffwechselfvorgänge sichtbar gemacht werden. Wie stark oder schwach sich die verwendete Substanz in der zu untersuchenden Körperregion anreichert, ist von dem Gewebe oder dem Entzündungsgrad bzw. -aktivität abhängig.

Das zwei- bzw. drei-Phasen Szintigramm gibt einen Überblick über die Anzahl der betroffenen Gelenke und dient zur Darstellung des Aktivitätszustandes der Entzündung.

Sie ist zudem zur Verlaufskontrolle empfehlenswert (*Fischer M. et al., 2002 / Gratz S. et al., 2002*).

Im Mehrphasenszintigramm lassen sich unterschiedliche Stadien darstellen:

- die erste Phase: arterielle und venöse Durchblutung
- die zweite Phase: Weichteilszintigrafie
- die dritte Phase: Skelettszintigrafie

Die Hyperämie des entzündeten Gebietes ermöglicht einen Überblick über den polyartikulären Befall und die Intensität der Synovialitis (*Mödder G. 2008 / Gratz S. et al., 2000*).

Eine Arthrosonographie ist hilfreich, um die Dicke der Gelenkschleimhaut darzustellen sowie notwendig, um eine Haemarthrose oder Baker-Zyste des Knies auszuschließen. Letzteres würde eine Kontraindikation darstellen. Die Arthrosonographie erfolgt mittels 7,5 MHz-Linearschallkopf in verschiedenen Ebenen (*Schneider P. et al., 2005 / Mödder G. 2008*).

Mittels MRT kann eine mögliche Hüftkopfnekrose oder ein Kniebinnenschaden als Ursache der Beschwerdesymptomatik ausgeschlossen werden. Damit lassen sich anatomische Strukturen wie Knochen und das umliegende Weichgewebe beurteilen (*Franke C. 2000*). Mittels Kontrastmittelgabe lassen sich Entzündungszustände, sowie -aktivität der Synovialis darstellen. Nur beim Nachweis einer Synovialitis ist die RSO hilfreich.

2.5 Verwendete Radioisotope

Für die Behandlung von rheumatoiden und arthritischen Gelenkerkrankungen zeigten die Radionuklide Yttrium-90, Rhenium-186 sowie Erbium-169 die besten Resultate. Früher, sowie noch heute in den USA, wurde bei Kniegelenken vorzugsweise Gold-198 verwendet. Aufgrund des Abtransportes über die Lymphbahnen in die Leber und die dadurch entstehende hohe Strahlenbelastung, wurde der Gamma-Strahler durch das Beta-emittierende Radionuklid Rhenium ersetzt und hat in Europa heute keine Verwendung mehr. Die heute verwendeten β -Strahler haben nur einen geringen Anteil an γ -Strahlung (Gratz S. et al., 2000).

Betastrahlung ist eine aus Elektronen bestehende Teilchenstrahlung, sogenannte Betateilchen. Ihre für die RSO wichtige Eigenschaft ist die geringe Reichweite im Körpergewebe und kann somit bei einer gezielten Injektion in das entzündete Gelenk wirken und einen hohen medizinischen Nutzen erbringen.

In Luft hat sie nur eine Reichweite von wenigen Millimetern und wird von bestimmten Kunststoffen wie Polymethylenmethacrylat (PMMA) weitgehend abgeschirmt (BfS 2001 / Schneider P. 2013)

Zu den wichtigsten Anforderungen an die Beta-Korpuskularstrahler zählt, dass sie das entzündlich veränderte Synovialgewebe durchdringen und sklerosieren, jedoch den darunter befindlichen Gelenkknorpel und die darüber liegende Haut nicht in Mitleidenschaft ziehen. Zudem muss das Radionuklid an Molekülen haften, welche klein genug sind, um von den Synovialmakrophagen aufgenommen zu werden. Aber groß genug, um keine Leakage (Verlust) als Folge zu haben. Zuletzt sollten die eingesetzten Transportmoleküle biologisch abbaubar sein, um keine Gewebegranulation zu induzieren (Gratz S. et al., 2000 / Schneider P. et al., 2005).

Diese radioaktiven Stoffe werden abhängig vom Gelenkumfang und Gelenkgröße unterschiedlich dosiert und verwendet (Gratz S. et al., 2000).

Für große Gelenke, wie das Knie, wird bevorzugt Yttrium injiziert. Bei mittleren Gelenken, wie Sprung-, Hand- und Schultergelenk wird Rhenium und bei kleinen Gelenken wie Fußzehen- und Fingergelenk wird Erbium eingesetzt. Dies beruht auf der unterschiedlichen Reichweite der jeweiligen Radionuklide (Mödder G. 2008 / Schneider P. et al., 2005).

Die durch die Betastrahler freigesetzte Energiedosis, die im menschlichen Körper nur eine Reichweite von wenigen Millimetern besitzt, wird zur Zerstörung des entzündeten bzw. kranken Gewebes ausgenutzt (Gratz S. et al., 2000 / Schneider P. et al., 2005 / Fischer M. et al., 2008).

Die hier aufgeführten Beta-Strahler sind an Mikrokolloide von einem Durchmesser zwischen 5-10 nm gebunden. Infolgedessen ist eine hohe Resorptionsrate bei einer geringen Leakage gewährleistet, was wiederum nur eine geringe Ganzkörperstrahlenbelastung des Patienten zur Folge hat (*Liepe K. et al., 2003*).

Diese Partikel sollen klein genug sein, um von den Makrophagen in der entzündeten Gelenkschleimhaut phagozytiert zu werden und um anschließend biochemische Effekte, wie Apoptose, Abtragung und Sklerosierung der entzündlich veränderten Synovialmembran zu initiieren (*Schneider P. et al., 2005*).

2.5.1 Yttrium-90-Citrat

^{90}Y ist ein Beta-Strahler mit einer Maximalenergie von 2,27 MeV, einer Grundenergie von 0,935 MeV, einer mittleren Reichweite von 3,6 mm und einer maximalen von 11 mm in Weichgewebe. Die physikalische Halbwertszeit liegt bei 2,7 Tagen (*Clunie G. et al., 2003*).

Yttrium zerfällt unter Emission von β -Teilchen zu stabilen ^{90}Zr , das keine toxische oder therapeutische Aktivität entwickelt. Dieses Radionuklid wird aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften hauptsächlich zur Therapie des Knies verwendet, die dabei eingesetzte Aktivität liegt bei durchschnittlich 185 MBq. Durch seine kleine Partikelgröße verteilt es sich gleichmäßig in der Gelenkflüssigkeit und wird nur zu einem geringen Anteil lymphogen abtransportiert (*Gratz S. et al., 2000*).

2.5.2 Rhenium-186-Sulfid

^{186}Re ist ein Beta-Strahler mit einer maximalen Energie von 1,07 MeV, einer Grundenergie von 0,349 MeV, einer mittleren Reichweite von 1,1 mm und einer maximalen von 3,7 mm. Mit einem neun prozentigen Anteil an Gammastrahlung hat es einen Photopeak bei 0,137 MeV. Die physikalische Halbwertszeit beträgt 3,7 Tage (*Clunie G. et al., 2003*).

Rhenium zerfällt durch die Abgabe von Beta-Strahlen zu ^{186}Os und wird durch Elektronenaufnahme zu ^{186}W . Durch den γ -Photopeak ist eine szintigraphische Darstellung mittels γ -Kameras nach Applikation des Nuklids möglich und zeigt die Verteilung im behandelten Gelenk. Mit Rhenium-Sulfid werden insbesondere Hand-, Ellenbogengelenk, oberes- bzw. unteres Sprunggelenk sowie Schulter behandelt (*Gratz S. et al., 2000*).

2.5.3 Erbium-69-Citrat

^{169}Er ist ein β -Strahler mit einer maximalen Energie von 0,34 MeV, einer Grundenergie von 0,099 MeV und einer mittleren Reichweite von 0,3 mm. Die physikalische Halbwertszeit liegt bei 9,4 Tagen (*Clunie G. et al., 2003*).

Dieser niedrigenergetische Strahler wird ausschließlich bei kleinen Gelenken, wie Fußzehen- und Fingergelenken verwendet. Erbium zerfällt zu stabilem ^{169}Tm , auch dieser β -Strahler hat einen geringen Anteil an Gamma-Strahlung, die therapeutisch vernachlässigbar und szintigraphisch nicht nutzbar ist. Die durchschnittlich verwendete Aktivität liegt bei 37 MBq (*Gratz S. et al., 2000*).

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Radionuklide

Radio-nuklid	Halbwertszeit (h)	Max./mittl. Reichweite Energie (MeV)	Max./mittl. Reichweite in Gewebe (mm)	Hautdosisleistung bei 1 MBq	Hautdosisleistung bei Kontamination	
				Punktquelle in 30cm Abstand	Gleichmäßige Verteilung 1kBq/cm ²	Tropfen von 0,05ml 1kBq
Y-90	64	2,28/0,93	11/3,6	0,030	0,56	0,38
Re-186	91	1,07/0,38	3,7/1,2	0,033	0,50	0,25
Er-169	226	0,34/0,10	1,0/0,3	0,003	0,31	0,08

Die Dosierung richtet sich nach Größe des Gelenkes und des Ausprägungsgrades der Entzündung, die Jahresaktivität von 700 MBq bei einem Patienten sollte nicht überschritten werden. Die maximale Aktivität eines Therapietages beträgt 400 MBq pro Patient (*Gratz S. et al., 2000*).

2.6 Strahlenwirkung

Bei der Therapie mit Yttrium wird aufgrund des höheren Patientenanteils und der höheren Aktivitäten eine größere Strahlenexposition des Personals durch Direktstrahlung hervorgerufen. Rhenium wird in einer geringeren Aktivität und bei weniger Patienten angewandt. Erbium trägt kaum einen Anteil an der Strahlenbelastung bei, da es schon durch die Kanüle und Handschuhe weitgehend abgeschirmt wird. Im Falle einer Kontamination der Haut tragen alle Beta-Strahler weitgehend gleich zur Strahlenexposition bei. Dies kann zu hohen Hautdosen des Anwenders führen. Die dabei entstehende Exposition ist höher als bei Kontakt mit einem Gamma-Strahler.

Chronische Radiodermatitis, stochastische und deterministische Strahlenschäden beim medizinischen Personal müssen verhindert werden (*Nestle U. et al., 2006*).

Strahlenexposition

Als Strahlenexposition bezeichnet man die Einwirkung von Strahlung auf den menschlichen Körper und Körperteile. Das Maß für die Strahlenexposition durch ionisierende Strahlung ist die Energiedosis. Die Energiedosis ist ein Maß für die vom Körper aufgenommene Energie und ist abhängig von der Strahlenart sowie von dem Gewebe und kann somit nur durch die Ionendosis und den Absorptionskoeffizienten errechnet werden, die physikalische Einheit ist das Gray[Gy]. Von ihr hängt die Art der zu erwartenden Strahlenschäden ab (*Krieger H. et al., 1992 / Fuhrmann A. 2013*).

Die Organdosis ist die durch ionisierende Strahlung aufgenommene Energiedosis, diese wird in Gray gemessen und mit dem Strahlungswichtungsfaktor w_R multipliziert. Die Einheit der Organdosis, auch als Äquivalentdosis bezeichnet, ist das Sievert [Sv].

Der Strahlungswichtungsfaktor w_R ist von der Strahlenart abhängig und berücksichtigt die unterschiedliche biologische Wirksamkeit, somit lassen sich die verschiedenen Strahlenarten miteinander vergleichen. Für Röntgen-, Beta-, Gammastrahlen sowie Elektronenstrahlen wird der Faktor $w_R=1$ zugeordnet (*Fuhrmann A., 2013*).

Die Effektive Dosis ist die Summe der Äquivalentdosen aller Organe multipliziert mit den einzelnen individuellen Organwichtungsfaktoren w_T und gibt die Strahlenbelastung für den Gesamtorganismus wieder, der Grenzwert liegt bei 20 mSv/a.

Im Strahlenschutz unterscheidet man zwischen der „Schutzgröße“, die von den Organen aufgenommene, jedoch nicht messbare Körperdosis und der „Messgröße“, die Äquivalentdosis, die vom Dosimeter erfasst wird und somit als Näherungswert für die Körperdosis gilt. Die Messgröße für Betastrahlung und niederenergetischer Photonenstrahlung (<15keV) ist die Oberflächenpersonendosis $H_p(0,07)$.

Haut-, Hand-, und Fußdosimetrie werden in einer Tiefe von 0,07 mm und einer Fläche von 1cm² am Trageort des Dosimeters gemessen und sind als Teilkörperexposition ein geeigneter Schätzwert für die Hautdosis (Kramer H. et al., 2000). Zur Messung der Strahlenexposition eignen sich spezielle Beta-Photonen-Ringdosimeter die am Ort der größten Exposition getragen werden sollen, wie zum Beispiel am Grundglied des Zeigefingers der nicht dominanten Hand bei der RSO (Rimpler A. et al., 2008).

Tabelle 2: Grenzwerte im beruflichen Strahlenschutz

Dosisgrenzwerte (im Kalenderjahr) nach §55 Strahlenschutzverordnung bzw.§ 31 a Röntgenverordnung		
	Beruflich strahlen-exponierte Personen	Personen unter 18 Jahren
Effektive Dosis	20 Millisievert	1 Millisievert
Organdosis: Auge	150 Millisievert	15 Millisievert
Organdosis: Haut, Hände Unterarm Füße und Knöchel	500 Millisievert	50 Millisievert

2.6.1 Deterministische Strahlenschäden

Akute Strahlenschäden können bei Strahlenunfällen eintreten, bei denen eine sehr hohe Dosis erreicht wurde. Die Symptome können bereits innerhalb von Tagen oder Wochen auftreten.

Dazu zählen:

- Hauterythem (Rötung, verbrennungsähnliche Erscheinung)
- Haarausfall
- Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit
- Blutarmut
- Übelkeit (Magen-Darm-Beschwerden)

Diese Erscheinungsbilder treten durch eine Abtötung von Zellen in Gewebe- und Organsystem auf. Die Schwere und der Eintritt des Schadens ist von der erhaltenen Dosis abhängig (BfS 2014).

Chronische Radiodermatitis

Die chronische Radiodermatitis gilt als Berufskrankheit bei Radiologen, erhöhte Teilkörperdosen vor allem an den Händen rufen diese Erkrankung hervor. Sie führen zu sklerotischen Veränderungen der Haut und können als Plattenepithelkarzinom enden.

2.6.2 Stochastische Strahlenschäden

Unter stochastischen Schäden versteht man Strahlenschäden, die aufgrund einer Strahlendosis eintreten können, die unter dem Schwellenwert für akute Strahlenschäden liegen. Bei dieser Art ist die Wahrscheinlichkeit, dass solch ein Strahlenschaden auftritt, umso größer desto höher die Strahlenexposition war. Es wird von einem linearen Dosis-Wirkungs-Prinzip ohne Schwellendosis ausgegangen. Das Risiko für stochastische Strahlenwirkungen wird durch die Dosis bestimmt.

Folgen können sein:

- Tumore
- Leukämie
- Augenkatarakte
- Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Sie resultieren aus einer fehlerhaften oder unzureichenden Reparatur der DNA, dadurch wird die genetische Information einer Zelle verändert und so bei der Zellteilung weitergegeben. Diesen Vorgang bezeichnet man als Mutation (BfS 2014). Abbildung 1 zeigt die deterministische und stochastische Strahlenwirkung im Vergleich.

Abbildung 1: Deterministische und stochastische Strahlenwirkung im Vergleich(BfS)

Vergleich zwischen deterministischen und stochastischen Strahlenwirkungen		
	<i>Deterministische Strahlenschäden</i>	<i>Stochastische Strahlenschäden</i>
<i>Beschreibung</i>	Meist unmittelbar auftretende Schäden an Geweben und Organen	Später auftretende Schäden aufgrund von Zellen, deren DNA (Erbmaterial) geschädigt wurde
<i>Ursache des Schadens</i>	Abtötung oder Fehlfunktionen zahlreicher Zellen	Mutationen und nachfolgende Vermehrung von einzelnen mutierten Zellen (Körperzellen oder Keimzellen)
<i>Dosis-Abhängigkeit</i>	Je höher die Strahlendosis, desto schwerer der Strahlenschaden	Je höher die Strahlendosis, desto höher die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Strahlenschadens
<i>Dosis-Schwellenwert</i>	zirka 500 Millisievert (mSv); beim ungeborenen Kind zirka 50 bis 100 mSv	Nicht vorhanden

3. Methodik

3.1 Gesetzliche Vorgaben

Ziel des Strahlenschutzes ist es, deterministische Strahlenschäden zu verhindern und die Wahrscheinlichkeit stochastischer Strahlenschäden zu minimieren.

Spezielle Schutzmaßnahmen müssen bei dem Umgang mit Betastrahlern dringend eingehalten werden. Der direkte Kontakt zwischen den Behältnissen mit den enthaltenen radioaktiven Lösungen und den Händen sollte strikt unterbunden werden.

Abstandshalter, wie Zangen und Plexiglasabschirmungen für die Behältnisse, werden zur Verringerung der Strahlenexposition verwendet.

Zusätzlich ist das Personal, das RSO-Produkte handhabt, dazu verpflichtet die Exposition mittels sogenannter Fingerringdosimeter aufzuzeichnen.

Dosisgrenzwerte nach der Strahlenschutzverordnung § 55

Nach §55 Absatz 2. der Strahlenschutzverordnung des Bundesgesetzblatt (BGBl.) sind die Jahresgrenzwerte für beruflich involviertes Personal mit 150 mSv für die Augenlinse, 500 mSv für die Hände bzw. Haut sowie die effektive Dosis mit 20 mSv festgelegt (*BGBl §55 Abs. 2*) Inwieweit dieser Grenzwert bei der Durchführung der Radiosynoviorthese mittels Manipulatoren überschritten wird, ist fraglich.

Das Bundesamt für Strahlenschutz äußert erhebliche Bedenken bei der Anwendung von Beta-Strahlern ohne eine Abschirmung aus Acrylglas. Dieses ist, ab einer gewissen Schichtstärke, in der Lage β -Strahlung fast vollständig abzuschirmen. Die zur Abschirmung benötigte Kunststoffdicke in cm entspricht der Hälfte der maximalen Energie in MeV.

Bei Yttrium, das eine maximale Energie von 2,26 MeV besitzt, reicht z.B. eine 1 cm dicke Acrylglasschicht aus, um es vollständig abzuschirmen. In Luft soll die maximale Reichweite bis zu drei Zehnerpotenzen größer sein, was bei der Verwendung von Yttrium einem neun-Meter-Radius entspräche (*Rimpler A. et al., 2007*).

Das Bundesamt für Strahlenschutz äußert insbesondere Bedenken bei der Präparation und Applikation der Spritzen, da durch die alleinige Berührung der ungeschützten Kanüle, oder durch kleinste Spritzer sehr hohe lokale Hautdosen hervorgerufen werden können.

Die Kontamination mit Beta-Strahlern erzeugt in Abhängigkeit der Reichweite eine weitaus größere Hautdosis als der Kontakt mit Gamma-Strahlern.

Bei ¹⁶⁹Er ist aufgrund der sehr kurzen Reichweite kaum eine Hautdosis zu befürchten. Eine Studie zur Einführung von TLD's ergab, dass die höchste Dosis am ersten Phalanx des linken Zeigefingers aufgezeichnet wurde (*Rimpler A. et al., 2007*).

Zusätzlich zu den gesetzlichen Regeln fordert die Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin folgende technische Voraussetzungen, die zum einen den Strahlenschutz und zum anderen die Behandlungsräume betreffen.

Zur Einhaltung des Strahlenschutzes gilt folgende gesetzliche Regelung:

- Umgangsgenehmigung für die verwendeten Nuklide
- Überwachung auf Kontamination
- Lagerung der Nuklide und Abfallbeseitigung
- Strahlenschutzüberwachung, ggf. Fingerdosimeter

Die Behandlungszimmer müssen von der Aufsichtsbehörde für die Durchführung der RSO zugelassen sein und bedürfen einer regelmäßigen Kontrolle auf Kontamination.

Intraartikuläre Punktionen sind nur unter Einhaltung der hygienischen Anforderungen zu tätigen. Zudem ist die Anzahl der sich im Operationssaal befindlichen Personen auf ein Minimum zu begrenzen (*Farahati J. et al., 1999*)

Das Vorhandensein eines C-Bogens (mobiles Röntgengerät) ist zur Darstellung der intraartikulären Lage der Nadel obligat. Alle Gelenke mit Ausnahme des Knies sollten unter Bildwandlerkontrolle punktiert werden. Für das Knie gilt als sicheres Zeichen der korrekten Position der Nadel die Aspiration von Gelenkflüssigkeit (*Mödder G. 2008*).

3.2 Fingerdosimeter

Die amtlichen Fingerdosimeter dienen zur Messung der Teilkörperdosis an den Händen. Dabei wird die Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$ bestimmt. Amtliche Fingerringdosimeter (Photonenteilkörperdosimeter) sind für die β -Dosimetrie nur bedingt geeignet, da durch die Beta-Emitter Mischstrahlungsfelder entstehen. Die durch das Bundesamt für Strahlenschutz ermittelten Werte seien um den Faktor „3“ geringer als die tatsächlichen Dosiswerte (*Rimpler A. et al., 2007*).

Die Photonen-Beta-Fingerringdosimeter sind bei den zuständigen amtlichen Personendosismessstellen anzufordern, um die Grenzwerte der Teilkörperdosis zu kontrollieren und einhalten zu können.

Eine Festlegung der Fachausschüsse von Bund und Ländern, zuständig für Strahlenschutz und Röntgenverordnung, besagen:

„Alle Personen, die mehr als 100 RSO-Anwendungen pro Jahr durchführen, müssen ein zweites Beta-Fingerringdosimeter und dieses nur bei der RSO-Anwendung tragen. Das Messergebnis dieses zweiten Teilkörperdosimeters wird mit dem Faktor „2“ multipliziert, so dass sich in der Summe für beide Teilkörperdosimeter der Faktor „3“ ergibt. Beide Ergebnisse werden separat mitgeteilt und bilanziert.“ (*LPS, 2009*).

Dies ist eine notwendige Festlegung der Fachausschüsse von Bund und Ländern zur Überwachung der Schwell- und Grenzwerte an RSO-Arbeitsplätzen.

Das Dosimeter dient der Erfassung der Teilkörperdosis und sollte somit bei der Radiosynoviorthese am ersten oder zweiten Glied des Zeigefingers der nicht dominanten Hand getragen werden. Die Finger stehen im unmittelbaren Kontakt mit den Behältnissen der radioaktiven Lösung und somit sind die Thermolumineszenzdetektoren (TLD's) an der die Kanüle haltenden Hand zu tragen. Der Detektor ist stets zur Strahlenquelle also zur Handinnenfläche auszurichten (*BfS, 2001*). Für die an der Radiosynoviorthese beteiligten Personen wird ein Fingerdosimeter benutzt, das für gemischte Beta- und Photonenstrahlungsfelder eingesetzt werden kann. Der Aufbau von konfektionierten Fingerringen für Photonen wird in Abb. 2 dargestellt.

Das Fingerdosimeter ist ein TLD aus Lithiumfluorid und misst die Strahlenexposition als Oberflächenpersonendosis $H_p(0,07)$, die Äquivalentdosis H_x in einer Tiefe von 0,07 mm gemittelt über eine Oberfläche von 1 cm^2 (*Grassi E. et al., 2011*).

In Form von Elektronen wird die einfallende Strahlung vom TLD absorbiert und auf Zwischenniveaus gespeichert. Die Elektronen werden durch die Anregung des Kristalls wieder freigesetzt und die dabei freiwerdende Energie in Form von Licht emittiert, die dabei entstehende Glühkurve ist ein Maß für die Strahlendosis. Das Licht wird bei der Auswertung der Dosimeter mittels Photomultiplier gemessen (Gratz S. et al., 2000 / LPS 2004).

Abbildung 2: konfektionierte Fingerringe für Photonen (schwarzes Innenteil der Linse) und Beta (silbernes Innenteil der Linse)



3.3 RSO-Durchführung

Die Radiosynoviorthese wird an der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin in Würzburg in einem dafür speziell eingerichteten Operationssaal durchgeführt. Dieser entspricht den Richtlinien der Strahlenschutzverordnung und wird speziell von einer medizinisch technischen Assistenz (MTA) für die Behandlung vorbereitet und anschließend entsprechend der Vorgaben gereinigt. Im Behandlungszimmer befindet sich ein C-Bogen, der zur Darstellung der intraartikulären Lage der Nadel dient. Das Abfüllen der Radionuklidlösungen in die Kanülen erfolgt durch eine Technikerin in einem dafür speziell vorgesehenen Labor. Zur Aufbewahrung der vorbereiteten Spritzen werden diese in einer mit Acryl ausgekleideten Bleibox gelagert (Abb. 3a,b). Während des ganzen Ablaufes werden Manipulatoren wie Zangen und lange Pinzetten zur Abstandshaltung verwendet.

Bei dieser Methode sind die Spritzen selbst nicht von einer zusätzlichen Acrylhülle umgeben, was den Umgang mit Abstandshaltern umso bedeutsamer macht. Denn selbst die Verfahrensweise, die Kanülen in die Acrylhüllen einzuführen und nach der Behandlung wieder zu entfernen, könnte die Strahlenbelastung des Personals erhöhen. Zudem besteht dabei das Risiko einer radioaktiven Kontamination.

Abbildung 3a: Transportbox aus Acrylglas zur Abschirmung der darin gelagerten Kanülen mit bereits aufgezogenen Radionukliden.

Abbildung 3b: Speziell vorbereiteter Assistentztisch mit Abfallbehälter, Acrylaufbewahrungsbox sowie Liste der verwendeten Isotope



Die Behandlung wird unter sterilen Bedingungen am Patienten durchgeführt.

Der Arzt, der die Nadel legt und das Radionuklid appliziert, trägt währenddessen sterile Latexhandschuhe über den unsterilen Vinylhandschuhen. Die MTA und die assistierende Person tragen unsterile Handschuhe, die nach jedem Eingriff gewechselt werden.

Der Patient wird in die korrekte Position gelagert, die Einstichstelle wird desinfiziert und bei großen Gelenken, wie z.B. dem Knie, erfolgt eine Punktion, wobei ein vorhandener Erguss abpunktiert werden kann. Dies gilt auch als sicheres Zeichen für die intraartikuläre Position der Nadel. Bei allen anderen Gelenken wird die Nadel unter Bildwandlerkontrolle mittels C-Bogens im Gelenkspalt platziert.

Die korrekte Positionierung wird zur Dokumentation ausgedruckt und archiviert. Die Nadel wird mittels Kornzange in Position gehalten und die Spritze entfernt. Nun reicht die MTA dem Assistenten mittels Kornzange die Spritze mit dem Radionuklid an.

Die Spritze wird an der Nadel befestigt und eventuell vorhandene Gelenkflüssigkeit aspiriert. Die nachfolgende Applikation des Nuklids wird durch den entstehenden Unterdruck sowie Entfernung von vorhandenem Röntgenkontrastmittel erleichtert. Die Abb. 4a-d zeigen die interaktive Zusammenarbeit zwischen Therapeut und assistierender Person während Applikation des Nuklids.

Die Nadel mit Kanüle wird ebenfalls mittels Kornzange abgenommen und zurück an die MTA gereicht, die diese in den radioaktiven Abfall entsorgt.

Bei großen Gelenken wird mit physiologischer Kochsalzlösung nachgespült, um die intraartikuläre Nuklidverteilung zu verbessern und um eine Verschleppung des Radionuklids in den Stichkanal zu verhindern. Dies ist bei kleinen Gelenken aufgrund des geringen Gelenkspaltes nicht möglich.

Der Therapeut, die assistierende Person sowie die MTA kommen durch das Verwenden einer Kornzange nicht in direkten Kontakt mit dem Behältnis, das die Radionuklidlösung enthält. Die damit gewährte Abstandshaltung verringert die Strahlenexposition auf den Fingerdosimetern erheblich. Die vom Bundesamt für Strahlenschutz vorgeschlagene Applikationsmethode wird auf Abb. 5 demonstriert, wobei eine Acrylglasabschirmung ohne Zuhilfenahme von verlängernden Abstandshaltern verwendet wird.

Nach der Injektion wird, außer bei ^{169}Er , ein Verteilungsszintigramm erstellt, um eine regelrechte intraartikuläre Nuklidverteilung zu dokumentieren und um eine extraartikuläre Verteilung auszuschließen (*Fischer M. et al., 2002 / Mödler G. 2008*).

Abbildungen 4a-d: Applikation des Radionuklids mittels Kocher'sche Klemme als Abstandshalter. Die blauen Handschuhe gehören zu dem assistierenden Therapeuten, der die Kanüle mittels Kocher'sche Klemme fixiert. Der durchführende Therapeut stützt sich an der Kocher'schen Klemme ab und appliziert mit der dominanten Hand das Nuklid.



Abbildung 5: Im Vergleich die alte Methode mit Acrylglasabschirmung ohne Kocher'sche Klemme als Abstandshalter



4. Ergebnisse

4.1 Retrospektive Datenerhebung

Innerhalb von drei Jahren wurden in der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin in Würzburg bei insgesamt 368 Patienten 547 Gelenke mit den radioaktiven Beta-Emittern Erbium, Rhenium sowie Yttrium therapiert. Während dieses Zeitraumes waren acht Teammitglieder, die sich aus drei praktizierenden Ärzten, zwei Krankenschwestern sowie drei medizinisch technischen Assistenten zusammensetzten, beteiligt.

Zur Dokumentation der Teilkörper-Personendosis bei dem involvierten Personal wurden zur Aufzeichnung der Strahlenexposition während des Hantierens mit den Beta-Strahlern, Thermolumineszenz-Fingerdosimeter (TLD's), jeweils am Grundgelenk des Zeigefingers getragen. Die monatliche Auswertung der Dosimeter erfolgte im Helmholtz Zentrum in München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH). Die dabei ermittelten Werte wurden an die Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin in Würzburg übermittelt (Tab. 3-5).

Die applizierte Menge, die Aktivität, das behandelte Gelenk sowie radiologische Aufnahmen mittels C-Bogen wurden während jedes Eingriffes dokumentiert. Aus diesen Daten sowie den Expositionswerten baut die retrospektive Studie auf, welche aufzeigen soll, ob mit dem in Würzburg angewandten Verfahren eine deutlich geringere Strahlenbelastung des Personals auftrat, als in den zuvor durchgeführten Studien (Andreeff M. et al., 2005/ BfS 2013/ Dolezal J. 2008/ Liepe K. et al., 2003/ Rimpler A. et al., 2007)

In Anbetracht der Anzahl der behandelten Gelenke konnte eine sehr geringe Exposition der Thermolumineszenz-Dosimeter verzeichnet werden. Insbesondere lag sie weit unterhalb der Grenzdosis von 500 mSv. Bei den für die Dosierung und Hantierung im Labor zuständigen MTA's wurde allerdings eine höhere Exposition als bei den Therapeuten gemessen. Sie lag jedoch weit unter dem medizinisch bedenklichen Grenzwert.

4.2 Datensammlung:

Tabelle 3-5: Verwendete radioaktive Menge [MBq] in den retrospektiven Jahren 2011-2013
(n=Anzahl der Gelenke)

2011	Erbium	n	Rhenium	n	Yttrium	n	Gesamt	n
Januar	126	5	381	9	1626	8	2133	20
Februar	130	5	648	8	970	5	1748	18
März	115	4	381	5	1760	9	2256	18
April	79	3	418	6	1355	7	1852	21
Mai	314	11	239	4	1275	6	1828	21
Juni	128	4	405	6	960	5	1493	15
Juli	301	11	152	2	590	3	1043	16
August	-	-	-	-	-	-	-	-
September	164	7	565	10	385	2	1114	19
Oktober	220	8	296	4	557	3	1073	15
November	182	7	234	3	1757	9	2173	19
Dezember	136	4	228	3	190	1	554	8
Gesamt	1895	69	3947	58	11425	58	17267	185

2012	Erbium	n	Rhenium	n	Yttrium	n	Gesamt	n
Januar	190	6	780	11	593	3	1563	20
Februar	192	6	988	12	1159	6	2339	24
März	241	10	655	9	118	6	2084	25
April	68	3	266	3	585	3	919	9
Mai	69	3	198	2	784	4	1051	9
Juni	212	8	419	4	962	5	1593	17
Juli	143	7	448	6	983	5	1574	18
August	109	3	-	-	585	3	694	6
September	37	1	226	3	775	4	1038	8
Oktober	225	8	225	3	1177	6	1627	17
November			148	2	1733	9	1881	11
Dezember	168	6	80	1	1066	5	1314	12
Gesamt	1654	61	4433	56	11590	59	17677	176

2013	Erbium	n	Rhenium	n	Yttrium	n	Gesamt	n
Januar	60	3	453	6	1160	6	1673	15
Februar	89	4	806	11	1312	7	2207	22
März	22	1	265	5			287	6
April	174	6	649	10	2852	15	3675	31
Mai	-	-	77	1	761	4	838	5
Juni	78,5	4	76	1	385	2	539,5	7
Juli	278	11	336	4	1726	10	2340	25
August	103	5	221	4	395	2	719	11
September	166	6	804	11	575	3	1545	20
Oktober	172	7	195	2	742	4	1109	13
November	32	1	232	3	959	5	1223	9
Dezember	265	13	301	5	765	4	1331	22
Gesamt	1439,5	61	4415	63	11632	62	17486	186

Tabelle 6-8: Strahlenexposition [mSv] der Therapeuten in den retrospektiven Jahren 2011-2013 in Bezug auf verwendete radioaktive Menge in [MBq]

2011 Aktivität [MBq]	T ₁ [mSv]	T ₂ [mSv]	T ₃ [mSv]
2133	0	1	1
1748	0	2	1
2256	2	2	0
1852	0	0	-
1828	0	-	0
1493	0	0	-
1043	-	-	-
-	0	0	-
1114	0	-	0
1073	2	0	0
2173	0	0	0
554	2	0	2
Σ 17267	6	5	4

2012 Aktivität[MBq]	T ₁ [mSv]	T ₂ [mSv]	T ₃ [mSv]
1563	0	0	0
2339	0	2	2
2084	2	2	-
919	0	0	0
1051	0	0	-
1593	0	0	0
1574	0	0	0
694	-	-	-
1038	-	-	-
1627	0	0	0
1881	0	0	-
1314	0	0	0
Σ 17677	2	4	2

2013 Aktivität[MBq]	T ₁ [mSv]	T ₂ [mSv]	T ₃ [mSv]
1673	0	2	0
2207	0	2	0
287	-	-	0
3675	0	0	4
838	0	0	0
539,5	0	0	0
2340	0	6	0
719	0	0	0
1545	0	2	0
1109	0	-	8
1223	0	2	0
1331	2	4	0
Σ 17486	2	18	12

Tabelle 9-11: Monatliche Auswertung der Strahlenexposition [mSv] der Assistenten in den retrospektiven Jahren 2011-2013 in Bezug auf die monatlich verwendete radioaktive Menge[MBq]

2011 Aktivität[MBq]	Schwester ₁ [mSv]	Schwester ₂ [mSv]	MTA ₁ [mSv]	MTA ₂ [mSv]	MTA ₃ [mSv]
2133	0	-	1	-	2
1748	1	-	5	-	1
2256	0	-	2	-	2
1852	2	0	5	-	4
1828	0	2	3	-	6
1493	0	1	3	-	14
1043	0	0	1	-	8
-	0	0	6	-	7
1114	0	1	6	-	7
1073	0	2	4	-	10
2173	1	1	4	-	12
554	1	0	7	-	8
Σ 17267	5	7	47	-	81

2012 Aktivität[MBq]	S ₁ [mSv]	S ₂ [mSv]	MTA ₁ [mSv]	MTA ₂ [mSv]	MTA ₃ [mSv]
1563	0	0	6	-	7
2339	7	3	18	-	3
2084	1	0	11	-	17
919	1	0	3	-	10
1051	2	0	9	-	11
1593	1	0	3	-	1
1574	-	2	17	-	3
694	0	-	26	-	0
1038	0	4	4	-	0
1627	0	3	8	7	-
1881	3	3	-	1	-
1314	0	1	3	0	-
Σ 17677	13	16	108	8	52

2013 Aktivität[MBq]	S ₁ [mSv]	S ₂ [mSv]	MTA ₁ [mSv]	MTA ₂ [mSv]	MTA ₃ [mSv]
1673	1	1	5	1	-
2207	0	1	5	0	-
287	1	2	9	1	-
3675	15	0	1	0	-
838	7	2	4	0	-
539	1	1	5	0	-
2340	2	3	0	0	-
719	4	1	9	0	-
1545	8	0	9	0	-
1109	1	2	0	0	-
1223	0	1	-	0	-
1331	2	0	-	1	-
Σ 17486	42	14	47	3	-

4.3 Ergebnisse

Im ersten Jahr der retrospektiven Studie bei 115, mit einer Gesamtaktivität von 17.267 MBq, therapierten Patienten, konnte eine geringe kumulative Dosis des beteiligten Personals verzeichnet werden.

Unter Verwendung der drei zulässigen Radionuklide ^{90}Y , ^{186}Re sowie ^{169}Er lag diese bei nur 155 mSv, dies entspricht 0.83 mSv pro Applikation bei 185 bestrahlten Gelenken.

Im darauffolgenden Jahr wurden bei 113 Patienten 176 Gelenke mit den β -Emittern bestrahlt, wobei eine Gesamtdosis von 205 mSv bei einer applizierten Aktivität von 17.677 MBq gemessen werden konnte (Tab. 12).

Auch im letzten Jahr der retrospektiven Auswertung wurde ein sehr geringer kumulativer Wert von nur 138 mSv verzeichnet (Tab. 12-13). Dieses Ergebnis setzt sich aus der Applikation an 186 Gelenken, davon 62 Kniegelenke bei insgesamt 140 Patienten zusammen (Tab. 12).

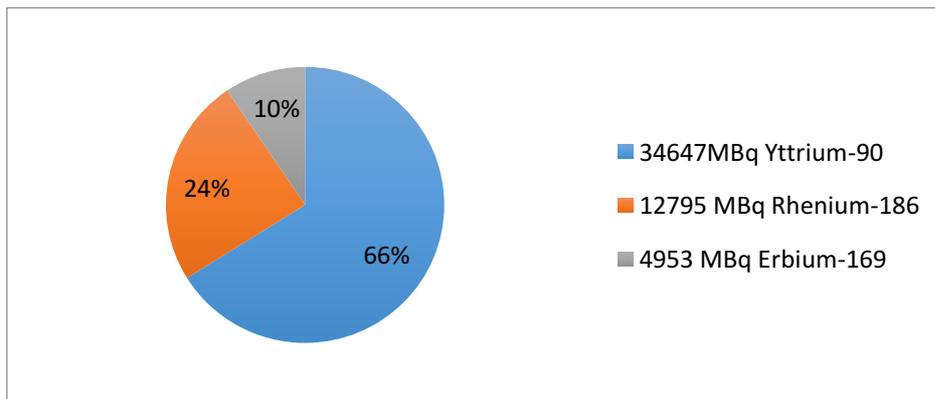
Die Radiosynoviorthese der Kniegelenke trägt mit der Applikation von Yttrium allein bis zu 66% an der Strahlenbelastung bei (Abb. 6). Somit ist ^{90}Y für die Hauptstrahlenbelastung verantwortlich, die zudem bei den MTA's am höchsten ausfiel (Tab. 3 -11).

Zusammenfassend nahmen 368 Patienten mit 547 therapierten Gelenken an der Studie teil. Yttrium kam im Verlauf bei 179 Kniegelenken zum Einsatz und trug somit zu einem erheblichen Teil der Strahlendosis bei. Durch das Helmholtz Institut in München wurde eine Gesamtstrahlendosis von 498 mSv, bei einer Aktivität von insgesamt 52.430 MBq dokumentiert, davon 34.647 MBq durch den Beta-Strahler ^{90}Y (Tab. 3-5 u. 12).

Tabelle 12: Menge der verabreichten β -Emitter, Anzahl der Gelenke (Applikationen) und kumulative Dosis des involvierten Personals

Jahr	Totale Dosis (mSv)	^{169}Er (MBq)	^{186}Re (MBq)	^{90}Y (MBq)	Total(MBq)	Applikationen Knie	Patienten	MBq/Applikation	$\mu\text{Sv}/\text{MBq}$	mSv/Applikation
2011	155	1859	3947	11425	17267	185(58)	115	93.3	8.9	0.83
2012	205	1654	4433	11590	17677	176(59)	113	100.4	11.6	1.16
2013	138	1440	4415	11632	17486	186(62)	140	94.0	7.9	0.74
Total	498	4953	12795	34647	52430	547(179)	368			

Abbildung 6 : Prozentuale Aufteilung der verwendeten radioaktiven Substanzen in [MBq]



4.4 Strahlenbelastung des Personals

Im Jahr 2011 wurde eine Gesamtaktivität von 17.267 MBq zur Therapie von 185 Gelenken verwendet, die während dieses Zeitraumes erreichte kumulative Organodosis bei dem beteiligten Personal belief sich auf nur 155 mSv (Tab. 12-13). Dies entspricht weniger als einem Drittel der zulässigen Strahlendosis von 500 mSv einer Einzelperson im Jahr.

Für die beiden Folgejahre 2012 und 2013 gelten größenordnungsmäßig ähnliche Zahlenwerte (Tab. 12).

Die für die Dosierungen und Abfüllung in die Spritzen verantwortlichen MTA's, haben jedoch eine weitaus höhere Strahlendosis erhalten, als die praktizierenden Ärzte und anreichenden Krankenschwestern. Die erhaltene Höchstdosis wurde im Jahr 2012 gemessen und lag bei 108 mSv für die MTA (Tab. 13).

Tabelle 13: Ergebnisse der Fingerring-TLD's über einen Zeitraum von 12 Monaten der retrospektiven Jahre.

Jahr	2011 (mSv)	2012 (mSv)	2013 (mSv)	Gesamt in 3 Jahren (mSv)
Therapeut 1	6	2	2	10
Therapeut 2	5	4	18	27
Therapeut 3	4	2	12	18
MTA 1	47	108	47	202
MTA 2	-	8	3	11
MTA 3	81	52	-	133
Schwester 1	5	13	42	60
Schwester 2	7	16	14	37
Gesamt	155	205	138	498

5. Diskussion

Das Bundesamt für Strahlenschutz berichtete von arbeitstäglichen Hautdosen, bei dem für die RSO tätigen Personal, von bis zu 100 mSv (Rimpler A. et al., 2007). Dies beträgt das Hundertfache der Dosis, die die Mitarbeiter am Universitätsklinikum Würzburg monatlich maximal erhalten haben, siehe Tabelle 6-11. Die Aufstellung zeigt die gesamte monatlich erhaltene Strahlenexposition auf, wobei nur die Exposition der MTA, die vor allem für das Befüllen der Kanülen verantwortlich ist, in einem erhöhten und dem Helmholtzzentrum zu meldenden Bereich liegt.

Durch die beim Bundesamt für Strahlenschutz aufgezeichneten Werte würde der Grenzwert von 500 mSv Hautdosis pro Kalenderjahr für Personal der Kategorie A schon bei fünf Anwendungstagen erreicht werden und das Personal müsste pausieren.

Das Bundesamt für Strahlenschutz weist darauf hin, dass eine Abstandshaltung, Nitril- oder Vinylhandschuhe sowie Acrylglasabschirmungen von 5 mm Dicke, deutlich zur Senkung der Strahlenbelastung führen. Die Behältnisse die radioaktive Lösungen beinhalten, sind stets in dafür vorgesehenen Abschirmbehältern zu belassen. Müssen diese zur vollständigen Entleerung entnommen werden, ist dies mit abstandsverlängernden Zangen zu tätigen.

Als zusätzliche Abschirmmaßnahmen für die Kanüle wird der Einsatz von Einweg-Makrolonringen (Abb. 7.) empfohlen (Rimpler A. et al., 2007). Diese müssen bereits vor der Punktion über den Nadelkonus gestülpt werden, führen jedoch zu einer erheblichen Behinderung der Punktion der Gelenke. Die dadurch bedingt verlängerte Handhabung während Punktion sowie Applikation der radioaktiven Substanz kann ebenfalls für erhöhte Hautdosen verantwortlich sein.

Abbildung 7: Makrolonring mit Kanüle und Spritzenprotector zur Abschirmung der Spritze (Rimpler A. et al., 2007)

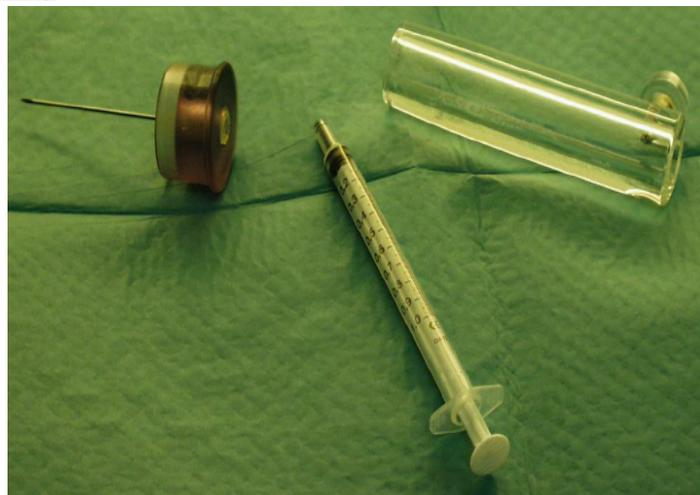


Abbildung 8: Applikation mit Makrolinring (Rimpler A. et al., 2007)



Bei der am Universitätsklinikum Würzburg erprobten Methode steht der Therapeut über die nicht dominante Hand weitaus weniger im Kontakt mit dem Radionuklid als bei der Verwendung der unhandlichen Makrolinringe (Abb. 7-8). Der Assistent fixiert die Nadel mittels Kocher'sche Klemme. An dieser stützt sich der Therapeut ab und injiziert mit der anderen Hand das Radionuklid (Abb. 9). Die Fixation von Nadel und Spritze erfolgt über eine zweite Person und minimiert somit die Strahlenexposition (Tab. 6-8).

Abbildung 9: Applikation mittels Kocher'sche Klemme und Assistenz am UKW



Bei der Einhaltung gewisser Strahlenschutzmaßnahmen soll eine mittlere spezifische Hautdosis an den Fingerspitzen der Ärzte auf ca. 2-3 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ reduziert werden können. Auch das Belassen des Nuklids in den dafür vorgesehenen Behältern beim Aufziehen soll die Expositionswerte auf 1 mSv/MBq verringern (Liepe K. et al., 2003 / Rödel R. et al., 2003).

In der Studie „Beta Radiation Exposure at the finger tips during the radionuclide synovectomy“ wurden innerhalb von 6 Therapietagen 27 Kniegelenke mit 6.365 MBq ^{90}Y , 44 mittelgroße Gelenke mit 3.459 MBq ^{186}Re und 84 kleine Gelenke mit 1.819 MBq ^{169}Er therapiert (Liepe K. et al., 2003).

Die β -Ortsdosimetrie wurde bei den Radiochemikern im Labor bei der Vorbereitung der Spritzen, bei den Therapeuten, die die Applikation des Nuklids durchführen sowie bei den Assistenten, die für das Anreichen und Entsorgen der Spritzen zuständig sind, aufgezeichnet, vergleichbar mit der von uns durchgeführten Methode (Tab. 6-11).

In dieser Studie wurden die Messungen in drei Messzyklen aufgeteilt, die sich wie folgt darstellen:

Im ersten Zyklus wurde die kumulative β -Dosis aller Radionuklide bestimmt. Die dabei verwendeten Aktivitäten beliefen sich auf 3.100 MBq Yttrium-90, 2.405 MBq Rhenium-186 und 1.204 MBq Erbium-169.

Während des zweiten Messzyklus wurden die TLD's bei der Verwendung unterschiedlicher β -Strahler ausgewechselt. Messungen der β -Dosis erfolgten bei 1.500 MBq ^{90}Y , 1.054 MBq ^{186}Re und 1.204 MBq ^{169}Er .

Zuletzt wurde im dritten Messzyklus während der Applikation eine Kocher'sche Klemme zur Fixierung der Injektionsnadel als Abstandshalter verwendet, was mit unserer Methode vergleichbar ist.

Dies diente zur Reduzierung der Strahlenbelastung an der Fingerkuppe des linken Zeigefingers und des Daumens. Während dieses Messzyklus wurde 1.665 MBq ^{90}Y verwendet.

Während des ersten Messzyklus wurde in allen Bereichen die Strahlenbelastung verzeichnet wobei bei den beiden letzten Zyklen nur noch im Arbeitsbereich des Therapeuten aufgezeichnet wurde.

Für die Hantierung mit ^{90}Y kam eine Plexiglasabschirmung zum Einsatz, die jedoch keine Verwendung bei ^{186}Re und ^{169}Er fand.

Sehr hohe Werte ergaben sich beim Aufziehen des radioaktiven Stoffes aus der gelieferten Rollrandflasche, die mit der linken Hand zwischen Daumen und Zeigefinger fixiert wurde. Trotz schützender Handschuhe ergaben sich Expositionswerte von 50 mSv als kumulative Handdosis. Die MTA's des UKW, die für das Aufziehen der Radionuklide verantwortlich sind, wiesen ebenfalls erhöhte Werte auf, siehe Tabelle 9-11.

Eine maschinelle Befüllung der Spritzen könnte die Dosen um ein Vielfaches verringern.

Während des Applikationsvorganges ohne Nutzung eines Hilfsmittels ergaben sich an der linken Hand des Therapeuten, die die Injektionsnadel fixierte, erhöhte Expositionswerte. Die höchste Dosis zeigten Zeigefinger und Daumen der nicht dominanten Hand.

Bei drei Therapiesitzungen mit 1.204 MBq ^{169}Er , 2.405 MBq ^{186}Re und 3.100 MBq ^{90}Y , betrug die kumulative Dosis des Therapeuten für den linken Zeigefinger 190 mSv und für den Daumen 48 mSv. Als maximale Ortsdosis ergibt sich dabei 0,56 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ (^{169}Er), 1,52 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ (^{186}Re). Diese Ergebnisse sind mit den bedenklichen Werten vom Bundesamt für Strahlenschutz vergleichbar (Rimpler A. et al., 2007).

Durch die Verwendung eines Manipulators zur Fixierung der Injektionsnadel konnte die Strahlenbelastung bei ^{90}Y von 22,09 auf 0,42 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ in der Studie von Liepe K. et al., reduziert werden, dies ist mit unseren Daten vergleichbar.

Die in Tabelle 12 dargestellten Werte beruhen auf einer Mittelung der verwendeten β -Strahler unter Nutzung einer Kocher'schen Klemme.

Im ersten Jahr der Studie bei einer verwendeten Gesamtaktivität von 17.267 MBq davon 11.425 MBq durch ^{90}Y , betrug die Strahlenbelastung aller beteiligter Personen in der Summe 155 mSv. Dies entspricht 8,9 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ bei Verwendung aller β -Strahler und ist vergleichbar mit der bei Liepe K. et al., gemessenen Belastung von 0,42 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$, bei ausschließlicher Verwendung von ^{90}Y (Liepe K. et al., 2003).

Letztendlich hat sich gezeigt, dass durch nur wenige Schutzmaßnahmen die Strahlenbelastung deutlich gesenkt werden konnte. Zum Beispiel empfiehlt es sich, die Rollrandflasche, während des Aufziehens des β -Strahlers, stets in dem Bleicontainer zu belassen (Rödel R. et al., 2003). Die anreichende Assistenz sollte zwischen der Handhabung der verschiedenen Radionuklide die Handschuhe regelmäßig wechseln und die Therapeuten sollten mit Hilfsmitteln, wie Plexiglasabschirmungen und Kocher'schen Klemmen arbeiten, um den Abstand zwischen Finger und Radiopharmakon zu erhöhen. Die Radiosynoviorthese ist nur an speziell dafür vorgesehenen Zentren durchzuführen. An den Fingerkuppen beider Zeigefinger ist das Tragen von Fingerdosimetern obligat.

In der Studie von Liepe K. et al., wird jedoch diskutiert, dass die amtlichen Fingerdosimeter die tatsächliche Strahlenbelastung nicht getreu widerspiegeln würden, da sie nur die Photonenkomponenten aufzeichnen, welche nur einen geringen Anteil an der Strahlenbelastung beiträgt.

Die amtlichen Fingerdosimeter sollen die Strahlenbelastung ungenügend erfassen und es besteht die Gefahr der Überschreitung des Grenzwertes der Organdosis für die Haut (nach §55 StrlSchV 500 mSv/Jahr) (Liepe K. et al., 2003).

Eine Studie des Bundesamtes für Strahlenschutz in 12 verschiedenen Einrichtungen ergab eine arbeitstägliche Hautdosis von mehr als 100 mSv (*BfS 2013*). Dies könnte unter anderem auf die verlängerte Handhabung mit Acrylglasabschirmungen während der Punktion und Injektion zurückzuführen sein. Eine lokale Hautdosis von 0,3-22 mSv/Applikation wurde in mehr als fünf Fällen der ^{90}Y Anwendung dokumentiert. Ohne Abschirmung sowie im direkten Kontakt mit den Spritzen würde diese theoretisch eine Exposition von 250 mSv/Applikation überschreiten.

Interessant ist, dass im Vergleich zu unseren Messergebnissen ebenfalls eine Reduktion der Strahlenbelastung bei Nutzung einer Kocher'schen Klemme um ein Vielfaches erzielt werden konnte. In unserer Studie ergaben sich durchschnittliche Werte von 0,18 mSv (gemittelt aus 0,05-034 mSv) pro Therapeut und Injektion, siehe Tabelle 12. Dabei wird angenommen, dass jeder Arzt eine gleiche Anzahl an Gelenken behandelt hat.

In einer französischen Studie wurde die Strahlenexposition des Personals während des Umganges mit radioaktiven Stoffen dokumentiert (*Lancelot S. et al., 2008*).

Unter anderem wurden auch Daten während der Radiosynoviorthese mittels ^{90}Y festgehalten. Zur Messung der Strahlenexposition wurden zwei TLD's an der Innenseite der Zeigefinger von Therapeuten, Radiopharmazeutikern sowie bei den assistierenden Krankenschwestern befestigt. Die Ergebnisse zeigen auch hier eine weit unter dem von der in der Studie von Liepe K. et al., aufgezeichneten Ergebnisse liegende Werte.

Statt eines Abstandshalters und eines 5 mm dicken Acrylglases zur Abschirmung kamen 10 mm dicke doppelte Acrylglasabschirmungen zum Einsatz.

Die Studie von Lancelot et al. soll die Anforderungen an Schutzmaßnahmen bei der Benutzung verschiedener Abschirmungsmaßnahmen während der Vorbereitung der Spritzen, der Therapie und der Nachsorge aufzeigen. Bei 10 Eingriffen (Patienten) der RSO, mit 72 Injektionen, nahmen zwei Radiopharmazeuten, zwei Radiologen, zwei Rheumatologen, drei Krankenschwestern und ein Spezialist für radiologische Schutzmaßnahmen teil.

Das Abfüllen der Spritzen erfolgte unter einer 10 mm dicken Abschirmung aus Acrylglas. Die Vorratsflaschen befanden sich entweder in der Verpackung oder wurden ebenfalls in einer doppelt abgeschirmten Glasumhüllung platziert. 37 bzw. 148 MBq wurden unter Benutzung einer 10 mm dicken Acrylglasschicht, in 1 ml Spritzen abgefüllt. Die Injektionen fanden unter aseptischen Bedingungen, nach Gelenkspunktion und Bildwandlerkontrolle, statt.

Im Unterschied zur Arbeitsgruppe von Liepe K. et al., die bei der Verwendung von 5 mm Acrylglasabschirmung zu Expositionswerten von 119 mSv an der linken Hand bei den Radiopharmazeuten führten, wurde bei Lancelot et al. aufgrund der Verwendung von Bleiglasabschirmung und doppelten Schutzsystem, sowie 10 mm Acrylglasabschirmung für die Spritzen, eine 60-fach geringere Exposition der linken Hand gemessen wurden.

In einer anderen Studie von Liepe K. et al., dienten Kornzangen mit 20 cm Länge zur Abstandshaltung, wobei man eine Fingerdosis von 22 μ Sv bei 37 MBq aufzeichnete.

Statt der Kornzangen benutzten sie eine 10 mm dicke Acrylglasabschirmung und wiesen dabei nur geringfügig höhere Werte von 57+-42 μ Sv bei 37 MBq auf (*Lancelot S. et al., 2008*).

An der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin der Universität in Würzburg werden Acrylglashüllen nicht bei jeder einzelnen Spritze verwendet. Da das Aufbringen und das spätere Entfernen zu einer erhöhten Strahlenbelastung führen könnte. Die leeren Einwegspritzen werden in Abwurfbehältern entsorgt und während der Handhabung immer mit langschenkigen Zangen gehalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass unsere Studie eine dreifach geringere Exposition aufzeigt, als bei der vom Bundesamt für Strahlenschutz empfohlenen Methode (*Rimpler A. et al., 2007*). Die Verwendung der unhandlichen Makrolonringe zur Abstandshaltung, die zunächst über die Nadel auf den Konus gestülpt werden müssen, beeinträchtigt die Handhabung und kann somit zu verlängerten Expositionszeiten führen. Das Gleiche könnte für die Acrylglasabschirmungen gelten, wenn die Punktion mit den Spritzen durchgeführt wird, die die Aktivität enthalten.

Es wurde berichtet, dass bei Rechtshändern die linke Hand, die vor allem für die Fixierung und den Trennvorgang der Kanüle von der Spritze verwendet wird, meist eine höhere Strahlenexposition aufwies (*Clunie G. et al., 2003 / Rimpler A. et al., 2007*).

Hauptverantwortlich für die Reduktion der Exposition in unserer Studie ist die Beteiligung von drei Personen, bestehend aus Therapeut, Assistent und MTA. Dies ermöglichte den Kontakt mit den Spritzen weitgehend zu unterbinden.

Die Auswertung der Fingerdosimeter ergab, dass die Organdosis im Beobachtungszeitraum von drei Jahren unter Anwendung der Würzburger Handhabungsmethode keine bedenklichen Werte erreicht hat.

Auch in anderen Einrichtungen zeigen die Ergebnisse nuklidspezifischer Messungen, dass die Hauptstrahlenbelastung durch das Radionuklid ^{90}Y zustande kommt (*Lancelot S. et al., 2008 / Liepe K. et al., 2003 / Rimpler A. et al., 2007*). Dies beruht zum einen auf der steigenden Anzahl behandelter Kniegelenke und den hohen Therapieaktivitäten, die für diese Gelenke verwendet werden. Zum anderen ist die hohe Eigenenergie ausschlaggebend, die durch Direktstrahlung einen hohen Beitrag zur Gesamtexposition leistet. Die Verwendung von ^{186}Re trägt einen geringeren Beitrag bei und ^{169}Er wird durch Handschuhe und Kanüle weitestgehend abgeschirmt. Bei Kontamination verursachen jedoch alle drei Korpuskularstrahler eine erhebliche Strahlenbelastung der Haut (*Clunie G. et al., 2003 / Rimpler A. et al., 2007*).

6. Zusammenfassung

Die Radiosynoviorthese ist ein etabliertes Therapieverfahren zur Behandlung der Synovialitis. Da bei der Radiosynoviorthese die Handhabung von radioaktiven β -Strahlern wie Yttrium, Rhenium und Erbium notwendig ist, sind bestimmte Schutzmaßnahmen einzuhalten. Zum Schutze des Patienten wurden Leitlinien aufgestellt, um die Strahlenbelastung so gering wie möglich zu halten. Die Exposition der bei der Vorbereitung und Applikation beteiligten Ärzte, Radiopharmazeuten sowie beteiligten Krankenschwestern bietet Raum für weitere Verbesserungen.

Eine Untersuchung des Bundesamt für Strahlenschutz dokumentiert höchst bedenkliche Zahlen, für die β -Ortsdosimetrie, die die zulässige Jahresdosis um ein Vielfaches überschreiten können.

Die Einführung von sogenannten Thermolumineszenzdetektoren, getragen als Ringdosimeter an den Grundgelenken der Zeigefinger, sollen realistische Expositionswerte aufzeichnen und somit eine Kontrolle der Dosis ermöglichen. Diese TLD's sind mit der Markierung „RSO“ gekennzeichnet und werden nur bei der Arbeit mit den radioaktiven Substanzen getragen. Die monatliche Auswertung dokumentiert die Strahlenexposition der beteiligten Personen.

In verschiedenen Studien wurden Methoden zur Minimierung der Strahlenexposition getestet. Sie führten zu dem Ergebnis, dass die Abschirmung mit Acrylglas, die Abstandshaltung durch langschenkliche Zangen sowie das Tragen von Nitril-Handschuhen am effektivsten zu einer Verringerung der Expositionswerte beitragen.

Ziel dieser retrospektiven Auswertung von Daten aus drei Jahren war es, die Effektivität der an der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin in Würzburg praktizierten Strahlenschutzmaßnahmen zu untersuchen.

Über einen Zeitraum von drei Jahren wurden 547 Gelenke in 368 Patienten mit 52.421 MBq, der drei Radionuklide ^{169}Er , ^{186}Re und ^{90}Y behandelt. Die Oberflächenpersonendosis $H_p(0,07)$ wurde mittels Fingerringdosimeter aufgezeichnet.

Die acht an der Radiosynoviorthese beteiligten Personen erhielten eine kumulative Hautdosis $H_p(0,07)$ von 498 mSv. Die kumulative Dosis pro Aktivität betrug somit weniger als 10 mSv/Bq. Sie lag pro Arzt bei 1,1 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ und pro MTA bei bis zu 4,5 $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$.

Die akkumulierte Hautdosis $H_p(0,07)$ während der Radiosynoviorthese war somit weitaus geringer im Vergleich zu den gesetzlichen Vorgaben und den zur Verfügung stehenden publizierten Daten.

7. Literaturverzeichnis

1. **Andreeff M., Wunderlich G., Behge K., Schönmath Th., Kotzerke J.**
β-Radiation exposure with ¹⁸⁸Re-labelled pharmaceuticals
Nuklearmedizin 2005; 44:94-98
2. **Bundesamt für Strahlenschutz**
Berufliche Exposition beim Umgang mit Betastrahlern
Jahresbericht 2001; 48-49f
unter: www.bfs.de/berichte/index.htm.
3. **Bundesamt für Strahlenschutz**
Ionisierende Strahlung – Akute Strahlenschäden
unter:http://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/akute-schaeden/akute-schaeden_node.html
2014
4. **Bundesamt für Strahlenschutz**
Merkblatt Empfehlungen zum Strahlenschutz bei der Radiosynoviorthese (RSO)
unter: www.bfs.de / (s. Anhang 10.1)
2013
5. **Bundesregierung**
Verordnung für die Umsetzung der Euroatom Richtlinien zum Strahlenschutz
Strahlenschutzverordnung(StrSchV)
Bundesgesetzblatt 2001; 38: 1741
6. **Delbarre F., Cayla J., Menkes C., Aignan M., Roucayrol JC., Ingrand J.**
La synoviorthese par les radioisotopes.
Presse Med. 1968; 76: 1045-1050
7. **Dolezal J.**
Beta Radiation exposure of the staff at the therapeutic and diagnostic nuclear medicine department. A single centre six years' retrospective study
Nuklearmedizin 2008; 47:175-177

8. **Clunie G., Fischer M., EANM**
EANM Procedure Guidelines for Radiosynovectomy
Eur J Nucl Med 2003; 30:12-16
9. **Farahati J., Reiners C., Fischer M., Mödder G., Franke C., Mahlstedt J., Sörensen H.,**
Leitlinie für die Radiosynoviorthese
Nuklearmedizin 1999; 38: 254-255
10. **Fischer M., Mödder G.**
Radionuclide therapy of inflammatory joint diseases
Nuclear Medicine Communications, 2002; 23: 829-831
11. **Franke C.**
Stellenwert der Radiosynoviorthese in Rheumatologie und Orthopädie
Schweiz Med Wochenschr 2000; 130: 77-83
12. **Fuhrmann A.**
Dosisbegriffe und Dosisgrößen für die ionisierende Strahlung
Zahnärztliche Radiologie
Georg Thieme Verlag 2013; 3: 32-33
13. **Grassi E., Sghedoni R., Piccagli V., Fioroni F., Borasi G. and Irori M.**
Comparison of two different types of LiF: Mg,Cu,P thermoluminescent dosimeters for detection of beta rays (Beta-TLDs) from $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr and ^{147}Pm sources
Health Physics 2011; 100: 515-522
14. **Gratz S., Göbel D., Behr T.M.**
Die Radiosynoviorthese eine effiziente Form der lokalen Therapie bei entzündlichen Gelenkerkrankungen
Dtsch Med Wochenschr. 2002; 127: 1704-1707
15. **Gratz, S., Göbel D., Becker W.**
Radiosynoviorthese bei entzündlichen Gelenkerkrankungen.
Der Orthopäde
Springer Verlag 2000; 29: 164-170

16. **Hovy L.**
Gelenkerhaltende Operationen und endoprothetischer Gelenkersatz bei Blutern
Indikation und Langzeitergebnisse.
Orthopäde 1999; 28: 356-365
17. **Kramer H.M., Ambrosi P., Christ G., Dietze G., Harder D., Janßen H., Miska H., Zink K.,**
Norm DIN 6814-3 Begriffe in der radiologischen Technik,
Teil 3: Dosisgrößen und Dosiseinheiten
Normenreihe DIN 6814
Beuth Verlag
18. **Krieger H., Petzold W.**
Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz
Band 1: Grundlagen 1992; 10.1: 263
B.G. Teubner Stuttgart
19. **Lancelot S., Guillet B., Sigrist S., Bourrelly M., Waultier S., Mundler O., Pisano P.**
Exposure of medical personnel to radiation during radionuclide therapy practise
Nuclear Medicine Communications 2008; 29: 405-410
20. **Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz**
Merkblatt zur Nutzung von Beta-Fingerringdosimetern bei RSO-Anwendung
unter: http://www.lps-berlin.de/fileadmin/user_upload/docs/pd/Merkblatt_RSO.pdf
2009 (siehe Anhang 10.2)
21. **Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung**
Die Fingerringdosimetrie
unter: <http://www.lps-berlin.de>
2004 (s. Anhang 10.3)
22. **Liepe K., Andreeff M., Mielcarek J., Barth I., Wunderlich G., Kropp J., Kotzerke J.**
Beta-radiation exposure at the finger tips during the radionuclide synovectomy
Nuklearmedizin 2003; 42: 104-106

23. **Mödder G.**
Radiosynoviorthese
In: Kuwert T., Nuklearmedizin
Georg Thieme Verlag 2008; 401-408
24. **Nestle U., Berlich J.**
Strahlenschutz in der Orthopädie Auswirkungen der neuen
Röntgenverordnung/Strahlenschutz in der Praxis
Orthopäde 2006, 35: 571-582
25. **Rimpler A., Barth I.**
Beta radiation exposure of medical staff and implications for extremity dose monitoring
Radiation Protection Dosimetry 2007; 125: 335-339
26. **Rimpler A., Barth I., Baum R.B., Senftleben S. and Geworski L.**
Beta radiation exposure of staff during and after therapies with ⁹⁰Y-labelled substances
Radiation Protection Dosimetry 2008; 131: 73-79
27. **Rödel R., Ebert A., Reichmann K., Reinhardt M., Palmedo H., Biersack H.-J., Mallek J.**
Effectiveness of syringe shieldings using radionuclides in radiation synovectomy
Nuklearmedizin 2003; 42: 50-53
28. **Schneider P.**
Radiosynovectomy: Science and Practise.
In: Fogelman I., Gnanasegaran G., van der Wall H.
Radionuclide and Hybrid Bone Imaging
Springer 2013; 915-934
29. **Schneider P., Farahati J., Reiners C.**
Radiosynovectomy in rheumatology, orthopedics, and hemophilia
The Journal of Nuclear Medicine 2005; 46: 48-54
30. **Schneider P., Biko J., Varazashvili L., Neumann S.**
β-Radiation exposure to fingertips after using a trained routine application method
during radiosynovectomy.
Nuclear Medicine communications 2014; 35: 1175-1178

8. Abbildungsverzeichnis:

- Abb.1: Vergleich deterministischer und stochastischer Strahlenwirkungen unter <http://www.bfs.de>
- Abb.2: konfektionierte Fingerringe für Photonen (LPS 2004)
- Abb.3a: Transportbox aus Acrylglas zur Abschirmung der darin gelagerten Kanülen mit bereits aufgezogenen Radionukliden.
- Abb.3b: Speziell vorbereiteter Assistenz Tisch mit Abfallbehälter, Acrylaufbewahrungsbox sowie Liste der verwendeten Isotope
- Abb.4a-d: Zeigen die Applikation des Radionuklids mittels Kocherklemme als Abstandshalter. Die blauen Handschuhe gehören zu dem assistierenden Therapeuten der die Kanüle mittels Kocher'sche Klemme fixiert. Der durchführende Therapeut stützt sich an der Kocher'schen Klemme ab und appliziert mit der dominanten Hand das Nuklid
- Abb.5: Im Vergleich die alte Methode mit Acrylglasabschirmung ohne Kocherklemme als Abstandshalter
- Abb. 6: Kreis prozentuale Darstellung der verwendeten radioaktiven Mengen
- Abb. 7: Makrolonring mit Kanüle und Spritzenprotektor zur Abschirmung der Spritze (Rimpler A., et al 2007)
- Abb. 8: Applikation mit Makrolinring (Rimpler A., et. Al 2007)
- Abb. 9: Applikation mittels Kocher'schen Klemme und Assistenz

9. Tabellenverzeichnis:

- Tab. 1: Eigenschaften der verwendeten Radionuklide, Merkblatt zum Strahlenschutz bei der Radiosynoviorthese (BfS 2014)
- Tab. 2: Grenzwerte im beruflichen Strahlenschutz (BGBI 2001)
- Tab. 3: Verwendete radioaktive Menge [MBq] in dem retrospektiven Jahr 2011 (n=Anzahl der Gelenke)
- Tab. 4: Verwendete radioaktive Menge [MBq] in dem retrospektiven Jahr 2012 (n=Anzahl der Gelenke)
- Tab. 5: Verwendete radioaktive Menge [MBq] in dem retrospektiven Jahr 2013(n=Anzahl der Gelenke)
- Tab. 6: Strahlenexposition [mSv] der Therapeuten in dem retrospektiven Jahr 2011 in Bezug auf verwendete radioaktive Menge in [MBq]
- Tab. 7: Strahlenexposition [mSv] der Therapeuten in dem retrospektiven Jahr 2012 in Bezug auf verwendete radioaktive Menge in [MBq]
- Tab. 8: Strahlenexposition [mSv] der Therapeuten in dem retrospektiven Jahr 2013 in Bezug auf verwendete radioaktive Menge in [MBq]
- Tab. 9: Monatliche Auswertung der Strahlenexposition [mSv] der Assistenten in dem retrospektiven Jahr 2011 in Bezug auf die monatlich verwendete radioaktive Menge[MBq]
- Tab. 10: Monatliche Auswertung der Strahlenexposition [mSv] der Assistenten in dem retrospektiven Jahr 2012 in Bezug auf die monatlich verwendete radioaktive Menge[MBq]
- Tab. 11: Monatliche Auswertung der Strahlenexposition [mSv] der Assistenten in dem retrospektiven Jahr 2013 in Bezug auf die monatlich verwendete radioaktive Menge[MBq]
- Tab. 12: Menge der verabreichten β -Emitter, Anzahl der Gelenke (Applikationen) und kumulative Dosis des involvierten Personals
- Tab. 13: Ergebnisse der Fingerring-TLD's über einen Zeitraum von 12 Monaten der retrospektiven Jahre.

10. Anhang

10.1 Bundesamt für Strahlenschutz

Merkblatt Empfehlungen zum Strahlenschutz bei der Radiosynoviorthese (RSO)
2013

10.2 Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz

Merkblatt zur Nutzung von Beta-Fingerringdosimetern bei RSO-Anwendung
2009

10.3 Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung

Die Fingerringdosimetrie
2004



MERKBLATT

Empfehlungen zum Strahlenschutz bei der Radiosynoviorthese (RSO)

Grundlagen

Die RSO ist ein Verfahren der Nuklearmedizin zur Behandlung chronisch entzündlicher Gelenkerkrankungen durch Injektion von Lösungen mit Betastrahlern in die betroffenen Gelenke. Bei diesem, vor allem in Deutschland verbreiteten Therapieverfahren werden die Nuklide Yttrium-90, Rhenium-186 und Erbium-169 in Form von kolloidalen Lösungen appliziert. Die Energie des Betastrahlers bestimmt die Reichweite der Strahlung in Gewebe und damit ihre Eignung für die Behandlung eines Gelenkes in Abhängigkeit von dessen Größe. Tabelle 1 enthält einige physikalische Größen der genannten Radionuklide.

Betastrahlung lässt sich durch Materialien niedriger Massenzahl, z. B. durch Kunststoffe wie Acrylglas (PMMA), gut abschirmen. Es gilt die Faustformel: Die maximale Reichweite der Betaeteilchen, d.h. die zur völligen Abschirmung nötige Kunststoffdicke in cm, entspricht etwa der Hälfte der Maximalenergie eines Nuklids in MeV. Die Betastrahlung des Y-90 wird z. B. mit ca. 1 cm Kunststoff völlig abgeschirmt.

In Luft ist die Reichweite dagegen um etwa drei Zehnerpotenzen größer, was in der Praxis häufig nicht beachtet wird. Als Faustformel gilt hier, dass die maximale Reichweite in Luft, angegeben in m, rund das Vierfache der Maximalenergie in MeV beträgt. Für Y-90 entspricht das einer Entfernung von ca. 9 m.

Die Messgröße für die Personendosis durch Betastrahlung und niederenergetische Photonenstrahlung (<15 keV) ist die Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$ [1]. Bei Teilkörperexpositionen der Extremitäten ist $H_p(0,07)$ ein geeigneter Schätzwert für die Hautdosis.

Der Grenzwert für die Organdosis der Haut für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A beträgt gemäß Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung 500 mSv/a.

Sachstand

Bei der RSO eines Kniegelenks werden bis etwa 300 MBq Y-90 appliziert. Bei der Präparation und Applikation der Spritzen können hohe

Radionuklid	Halbwertszeit (h)	Max./mittl. Energie (MeV)	Max./mittl. Reichweite in Gewebe ¹⁾ (mm)	Hautdosisleistung für 1 MBq (μ Sv/s)	Hautdosisleistung bei Kontamination (μ Sv/s)	
				Punktquelle in 30 cm Abstand	Gleichmäßige Verteilung (1 kBq/cm ²)	Tropfen von 0,05 ml (1 kBq)
Y-90	64	2,28/0,93	11/3,6	0,030	0,56	0,38
Re-186	91	1,07/0,38	3,7/1,2	0,033	0,50	0,25
Er-169	226	0,34/0,10	1,0/0,3	0,003	0,31	0,08

¹⁾ gilt annähernd auch für Kunststoffe mit einer Dichte von ca. 1g/cm³ (PMMA, PE, PP)

Tabelle 1: Eigenschaften der zur RSO verwendeten Radionuklide (nach [2, 3])

Merkblatt zur Nutzung von Beta-Fingerringdosimetern bei Radiosynoviorthese (RSO)-Anwendungen

Ausgabe Oktober 2009

Die im Rahmen des BfS-Konzeptes zur Ermittlung der Aussagefähigkeit von amtlichen Beta-Teilkörperdosimetern unter Praxisbedingungen durchgeführten Messungen haben ergeben, dass die Messwerte amtlicher Fingerringdosimeter an Arbeitsplätzen der Radiosynoviorthese (RSO) durchschnittlich um den Faktor 3 niedriger liegen als die tatsächlichen Werte. Grundvoraussetzung für den Faktor 3 ist, dass das Teilkörperdosimeter an der „richtigen“ Stelle getragen und der notwendige Strahlenschutz eingehalten wird (s. „Merkblatt zum Strahlenschutz bei der Radiosynoviorthese“ des BfS).

Festlegung der Fachausschüsse von Bund und Ländern

Der Fachausschuss Strahlenschutz und der Länderausschuss Röntgenverordnung als zuständige Behörden von Bund und Ländern haben eine besondere Verfahrensweise zur Messung der Teilkörperexposition an RSO-Arbeitsplätzen angeordnet:

Alle Personen, die mehr als 100 RSO-Anwendungen pro Jahr durchführen, müssen ein zweites Beta-Fingerringdosimeter und dieses nur bei der RSO-Anwendung tragen. Das Messergebnis dieses zweiten Teilkörperdosimeters wird mit dem Faktor 2 multipliziert wird, so dass sich in der Summe für beide Teilkörperdosimeter der Faktor 3 ergibt. Beide Ergebnisse werden separat mitgeteilt und bilanziert.

Betroffener Personenkreis

Der Strahlenschutzverantwortliche muss der zuständigen Behörde die Personen benennen, die an RSO-Arbeitsplätzen eingesetzt werden. Die Behörde legt dann fest welche Personen das Kriterium > 100 RSO-Anwendungen im Jahr erfüllen und ordnet für diese Personen die zusätzliche Überwachung an. Die Behörde oder der Strahlenschutzbeauftragte melden die Personen zur Überwachung bei der Messstelle an.

Organisation in der Messstelle der LPS

Alle benannten Personen erhalten ein zweites Teilkörperdosimeter, das auf dem Zuordnungs- und Ergebnisbogen das Merkmal „RSO“ (Code 41 im Feld Zweck) enthält. Das Merkmal RSO führt bei der Auswertung des Beta-Fingerringdosimeters automatisch zu einer Multiplikation des gerundeten Messwertes mit dem Faktor 2. **Dieses Dosimeter muss als zusätzliches Dosimeter und NUR bei der RSO-Anwendung getragen werden.** Zur Überwachung der Schwell- und Grenzwerte werden die gerundeten Messergebnisse beider Teilkörperdosimeter addiert.

Kontaktperson

Bei Fragen zur Teilkörperdosimetrie wenden Sie sich bitte an Dr. Engelhardt (Tel. 030/6576-3125, engelhardt@LPS-Berlin.de) oder besuchen Sie unsere Homepage www.LPS-Berlin.de.

gez. Dr. E. Martini
Messstellenleiter



Die Fingerringdosimetrie

1 Eigenschaften des Fingerringdosimeters

Für die Überwachung der Teilkörperexposition gemäß StrlSchV § 41 Abs. 3 bzw. RöV § 35 Abs. 5 kann das Photonen-Fingerringdosimeter Typ HARSHAW TKD 2000 für reine Photonenstrahlenfelder und das Beta-Fingerringdosimeter Typ HARSHAW BTKD 2001 für gemischte Beta- und Photonenstrahlenfelder bzw. für reine Betastrahlenfelder eingesetzt werden. Das Fingerringdosimeter ist ein Thermolumineszenzdetektor (TLD) und misst die Strahlenexposition als Äquivalentdosis H_x bzw. als Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$.

Das Fingerringdosimeter kann auch zur Überwachung der Augendosis und anderer Teilkörperexpositionen eingesetzt werden.

2 Nachweisgrenzen und Nenngebrauchsbereich

Der Photonen-Fingerring [s. Merkblatt zur Photonen-Fingerringdosimetrie]

Eine Dosis von 0,2 mSv als untere Grenze ist sicher nachweisbar und liegt damit deutlich unterhalb der gesetzlichen Forderung von 1 mSv. Die obere Messgrenze liegt bei 10 Sv. Die Reproduzierbarkeit im gesamten Messbereich ergibt einen Variationskoeffizienten $\nu < 4\%$. Das Fingerringdosimeter misst die Strahlenexposition als Äquivalentdosis H_x .

Nenngebrauchsbereich der Dosimetersonde:		Messunsicherheit
Photonenenergie	10 keV bis 1400 keV	± 24 %
Strahleneinfallswinkel	0° bis ±60°	
Umgebungstemperatur	10° C bis 40° C	- 2 %

Das Dosimeter hat ein Fading von max. 10 % im Jahr. Das Fading spielt aber bei einer Tragezeit von 1 Monat keine Rolle.

Das Dosimeter besitzt eine PTB-Bauartzulassung (23.02/98.01).

Der Beta-Fingerring [s. Merkblatt zur Beta-Fingerringdosimetrie]

Eine Dosis von 0,2 mSv als untere Grenze ist sicher nachweisbar und liegt damit deutlich unterhalb der gesetzlichen Forderung von 1 mSv. Die obere Messgrenze liegt bei 10 Sv. Die Reproduzierbarkeit im gesamten Messbereich ergibt einen Variationskoeffizienten $\nu < 5\%$. Das Fingerringdosimeter misst die Strahlenexposition als Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$.

Nenngebrauchsbereich der Dosimetersonde:		Messunsicherheit
Elektronenenergie (Beta)	60 keV bis 2300 keV	± 23 %
Photonenenergie	15 keV bis 1400 keV	
Strahleneinfallswinkel	0° bis ±60°	
Umgebungstemperatur	10° C bis 40° C	- 8 %

Das Dosimeter hat ein Fading von max. 6 % im Jahr. Das Fading spielt aber bei einer Tragezeit von 1 Monat keine Rolle.

Das Dosimeter besitzt eine PTB-Bauartzulassung (23.52/03.01).

3 Aufbau des Fingerringdosimeters

Das Dosimeter besteht aus drei Teilen: dem Einweg-Ring (s. Abb. 1 rechts Nr. 1), dem Thermolumineszenzdetektor (s. Abb. 1 rechts Nr. 2) auf einem kreisförmigen Träger mit Barcode und einer Abdeckung als diskusförmige Linse (s. Abb. 1 rechts Nr. 3). Der Einweg-Ring besteht aus einem glasfaserverstärkten Kunststoff (Polypropylen) und ist für Finger mit einem Durchmesser von 14

Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Peter Schneider danke ich für die Idee und die Überlassung des Themas sowie den stetigen Korrekturarbeiten und freundliche Unterstützung bei der Arbeit.

Für Aufmunterung und Motivation gilt mein besonderer Dank meinen Eltern und meiner Schwester Larissa Neumann

Widmen möchte ich diese Arbeit meiner Familie ohne deren Unterstützung mein Studium und die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Eure Sabrina

München im Dezember 2015