



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Studie über die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung von hochradioaktiven Strahlenquellen durch alternative Technologien in Deutschland

Vorhaben 3618S22363

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG

P. Denger
M. Görlich
M. Bernard
L. Steppat

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,
nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes
für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

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

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

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-202/22

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2022091534437

Salzgitter, September 2022

Studie über die
Notwendigkeit, Möglichkeit
und Machbarkeit der
Ablösung von
hochradioaktiven
Strahlenquellen durch
alternative Technologien in
Deutschland
– Kurzversion –

Philipp Denger, Malte Görlich, Martin Bernard, Lisa Steppat

28.10.2020

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

Inhalt

1.	Einleitung.....	4
2.	Hochradioaktive Strahlenquellen.....	5
2.1.	Umschlossene radioaktive Stoffe.....	6
2.2.	Kategorisierung umschlossener radioaktiver Stoffe.....	7
2.3.	HRQ-Erfassung in Deutschland.....	7
3.	Risiken.....	9
3.1.	Radiological Exposure Device.....	9
3.2.	Radiological Dispersal Device.....	10
4.	Anwendungsbereiche.....	11
4.1.	Großkammerbestrahlung.....	14
4.2.	Teletherapie.....	14
4.3.	Prozessüberwachung.....	14
4.4.	Gammaradiographie.....	16
4.5.	Brachytherapie.....	17
4.6.	Forschung.....	17
4.7.	Kleinkammerbestrahlung.....	18
4.8.	Bohrlochuntersuchungen.....	18
4.9.	Kerntechnik.....	18
4.10.	Sonstige Anwendungen.....	18
5.	Alternative Technologien.....	20
5.1.	Großkammerbestrahlung.....	20
	<i>Produktkompatibilität.....</i>	21
	<i>Dosishomogenität.....</i>	21
	<i>Möglichkeit der Produktbeeinträchtigung.....</i>	21
	<i>Einmalige und laufende Kosten.....</i>	21
	<i>Volumendurchsatz.....</i>	22
	<i>Ausfallzeiten und Verfügbarkeit.....</i>	22
	<i>Sicherheit des Personals.....</i>	22
5.2.	Teletherapie.....	22
	<i>Medizinische Effektivität.....</i>	23
	<i>Einmalige und laufende Kosten.....</i>	24
	<i>Behandlungsdauer und Patientendurchsatz.....</i>	24
	<i>Personalqualifikation.....</i>	25
	<i>Sicherung gegen unbefugten Gebrauch.....</i>	25

5.3. Prozessüberwachung.....	25
<i>Einmalige und laufende Kosten</i>	26
<i>Genauigkeit</i>	26
<i>Messgutbedingungen</i>	27
<i>Äußere Bedingungen</i>	27
<i>Möglichkeit der kontaktlosen Messung</i>	29
5.4. Gammaradiographie.....	29
<i>Einmalige und laufende Kosten</i>	29
<i>Prüfgeschwindigkeit</i>	30
<i>Umgebungsbedingungen</i>	30
<i>Abhängigkeit der Prüfaussage vom Prüfobjekt</i>	30
<i>Verfügbarkeit von Durchführungsnormen</i>	30
5.5. Brachytherapie	31
<i>Medizinische Effektivität</i>	31
<i>Einmalige und laufende Kosten</i>	32
<i>Strahlenschutz des Personals</i>	33
5.6. Kleinkammerbestrahlung	33
5.6.1. Bestrahlung von Blutprodukten	33
<i>Einmalige und laufende Kosten</i>	34
<i>Dosishomogenität</i>	35
<i>Bestrahlungsdauer</i>	35
<i>Ausfallzeiten</i>	35
5.6.2. Bestrahlung von Forschungsgegenständen.....	35
<i>Einmalige und laufende Kosten</i>	36
<i>Dosishomogenität</i>	36
<i>Bestrahlungsdauer</i>	36
<i>Vergleichbarkeit von Studienergebnissen aus früheren Forschungen</i>	36
5.7. Bohrlochuntersuchungen.....	37
<i>Anschaffungskosten</i>	38
<i>Haltbarkeit / maximale Verwendungsdauer</i>	38
<i>Ausfallsicherheit während der Bohrlochuntersuchung</i>	38
<i>Kompaktheit bzw. Kombinationsmöglichkeit mit anderen Messsystemen im gleichen Bohrwerkzeug</i>	38
<i>Vergleichbarkeit mit Messergebnissen aus früheren Bohrlochuntersuchungen</i>	39
<i>Sicherung gegen unbefugten Gebrauch</i>	39
5.8. Kerntechnik	40

6.	Vergleich der Technologien.....	41
6.1.	Großkammerbestrahlung zur Sterilisation	42
	<i>Votum und Prognose</i>	43
6.2.	Teletherapie	43
	<i>Votum und Prognose</i>	43
6.3.	Prozessüberwachung.....	44
	<i>Füllstandsmessung</i>	44
	<i>Dicken- bzw. Flächengewichtsmessung</i>	45
	<i>Votum und Prognose</i>	45
6.4.	Gammaradiographie.....	46
	<i>Röntgenanlagen</i>	46
	<i>Beschleunigeranlagen</i>	47
	<i>Aktive Thermographie</i>	48
	<i>Klassischer Ultraschall</i>	48
	<i>Phased Array Ultraschall</i>	49
	<i>TOFD Ultraschall</i>	50
	<i>EMAT</i>	50
	<i>Votum und Prognose</i>	51
6.5.	Brachytherapie	52
	<i>Votum und Prognose</i>	53
6.6.	Kleinkammerbestrahlung	54
6.6.1.	Bestrahlung von Blutprodukten	54
	<i>Votum und Prognose</i>	54
6.6.2.	Bestrahlung von Forschungsgegenständen.....	54
	<i>Votum und Prognose</i>	54
6.7.	Bohrlochuntersuchungen.....	55
	<i>Votum und Prognose</i>	55
7.	Fazit	56
	Literaturverzeichnis.....	57

1. Einleitung

Hochradioaktive Strahlenquellen (HRQ) sind weltweit in zahlreichen Anwendungsbereichen im Einsatz und leisten in den Gebieten Medizin, Forschung und Industrie wichtige Beiträge. So werden beispielsweise in der Medizin HRQ zur Strahlentherapie oder zur Sterilisation von Blut und Blutprodukten eingesetzt. Im Bereich der Forschung sind HRQ u. a. bei der Untersuchung von Zellen, Kleintieren und Werkstoffen im Einsatz. In der Industrie werden HRQ insbesondere in den Bereichen zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (Gammadiagnostik) und Prozessüberwachung verwendet.

Trotz der Vorteile durch die Nutzung müssen allerdings auch die Risiken dieser Techniken, insbesondere durch gestohlene oder herrenlose HRQ, betrachtet werden. Dies ergibt sich direkt aus dem Rechtfertigungsgebot¹ des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) [1]. Die Rechtfertigung von Tätigkeiten kann überprüft werden, sobald wesentliche neue Erkenntnisse über den Nutzen oder die Auswirkungen dieser Tätigkeit vorliegen; eine Überprüfung ist zudem dann sinnvoll, wenn wesentliche neue Informationen über alternative Verfahren und Techniken verfügbar sind (§ 6 Abs. 2 StrlSchG). Daher werden in dieser Studie alternative Technologien untersucht, die das Potential besitzen, bisherige Tätigkeiten mit HRQ ersetzen zu können.

Doch auch bei gerechtfertigten Tätigkeiten mit HRQ ist die Untersuchung von alternativen Technologien mit geringerem radiologischen Risiko angebracht, um das Optimierungsgebot² des StrlSchG zu berücksichtigen. So kann beispielsweise eine Technik, die bei gleichem Nutzen mit geringeren Aktivitätsmengen auskommt, eine sinnvolle Optimierung darstellen. Für Optimierungen im Bereich von HRQ-Tätigkeiten müssen immer die Umstände des Einzelfalls und der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt werden. Diese Studie soll daher auch im Bereich der Minimierung des radiologischen Risikos zweckmäßige Alternativtechnologien betrachten.

Vergleichbare Studien gibt es bereits auch für einige andere Länder; die dort gewonnenen Erkenntnisse werden – sofern sie auch für die Anwendungen in Deutschland relevant sind – in dieser Studie mitberücksichtigt.

¹ „Neue Tätigkeitsarten, mit denen Expositionen von Mensch und Umwelt verbunden sein können, müssen unter Abwägung ihres wirtschaftlichen, gesellschaftlichen oder sonstigen Nutzens gegen die möglicherweise von ihnen ausgehende gesundheitliche Beeinträchtigung gerechtfertigt sein. [...]“, § 6 Abs. 1 StrlSchG

² „Wer eine Tätigkeit plant, ausübt oder ausüben lässt, ist verpflichtet, jede Exposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten. [...]“, § 8 Abs. 2 StrlSchG

2. Hochradioaktive Strahlenquellen

Hochradioaktive Strahlenquellen sind gemäß § 5 Abs. 36 StrlSchG [1] umschlossene radioaktive Stoffe, deren Aktivität mindestens einem bestimmten (je nach Nuklid unterschiedlichen) Wert entspricht, der in § 83 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [2] definiert ist. Diese nuklidspezifischen HRQ-Werte sind in der Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 4 StrlSchV angegeben. Für die in Deutschland verwendeten Nuklide sind in der Tabelle 1 diese HRQ-Werte aufgelistet. Dabei sind zum Vergleich auch die heute nicht mehr gültigen HRQ-Werte aus der vergangenen Version der StrlSchV aus dem Jahr 2001 mit aufgeführt³. Im Zuge der Neufassung der StrlSchV wurden u. a. die HRQ-Werte im Sinne der internationalen Harmonisierung angepasst.

Tabelle 1: HRQ-Werte in Deutschland im Vergleich

Nuklid	HRQ-Wert (StrlSchV 2001)	HRQ-Wert (StrlSchV 2018)
	in GBq	in GBq
Co-60	4	30
Se-75	30	200
Sr-90	3	1000
Cs-137	20	100
Ir-192	10	80
Pu-238	100	60
Pu-239	100	60
Am-241	100	60
Cf-252	0,5	20

Anhand der alten und neuen HRQ-Werte ist erkennbar, dass einige umschlossene radioaktive Stoffe, die in Deutschland vor 2018 noch als HRQ eingestuft waren, nun per Definition nicht mehr als hochradioaktive Strahlenquellen zu betrachten sind. Ein Beispiel für den umgekehrten Fall stellt das Nuklid Am-241 dar. Die Hintergründe und Auswirkungen dieser Definitionsänderung werden ausführlicher in den Abschnitten 2.2 und 2.3 beschrieben.

³ Die Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 wurde durch die „Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts“ vom 29. November 2018 außer Kraft gesetzt und durch die neue Strahlenschutzverordnung, die am 31.12.2018 in Kraft trat, ersetzt.

2.1. Umschlossene radioaktive Stoffe

Bevor die Kategorisierung von umschlossenen radioaktiven Stoffen anhand ihrer Aktivität in den nächsten Abschnitten beschrieben wird, ist es zielführend die in Deutschland gültige Definition dieser Stoffe im internationalen Vergleich zu betrachten:

[§ 5 Abs. 35 Strahlenschutzgesetz \[1\]](#)

Umschlossene radioaktive Stoffe: Radioaktive Stoffe, die ständig von einer allseitig dichten, festen, nicht zerstörungsfrei zu öffnenden, inaktiven Hülle umschlossen oder in festen inaktiven Stoffen ständig so eingebettet sind, dass bei üblicher betriebsmäßiger Beanspruchung ein Austritt radioaktiver Stoffe mit Sicherheit verhindert wird; eine Abmessung des umschlossenen radioaktiven Stoffes muss mindestens 0,2 Zentimeter betragen.

[Art. 4 EU-Richtlinie 2013/59/EURATOM \[3\]](#)

Umschlossene Strahlenquelle: eine radioaktive Strahlenquelle, in der das radioaktive Material ständig in einer Kapsel eingeschlossen oder in eine feste Form so eingebettet ist, dass bei üblicher betriebsmäßiger Beanspruchung jede Verbreitung radioaktiver Stoffe verhindert wird.

[IAEA BSS: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources \[4\]](#)

Sealed source: A radioactive source in which the radioactive material is permanently sealed in a capsule or closely bonded and in a solid form.

[10 CFR Part 110.2, USA, Code of Federal Regulations \[5\]](#)

Sealed source means any special nuclear material or byproduct material encased in a capsule designed to prevent leakage or escape of that nuclear material.

Obwohl das Strahlenschutzgesetz [1] direkt auf die Euratom-Richtlinie [3] zurückzuführen ist und diese sich wiederum u. a. an den IAEA Basic Safety Standards [4] orientiert, sind die Definitionen eines umschlossenen radioaktiven Stoffs im Detail unterschiedlich. So sieht beispielsweise das deutsche Strahlenschutzrecht eine Mindestabmessung vor, die es im internationalen Regelwerk nicht gibt. Zudem ist die (europäische) Einschränkung auf die „übliche betriebsmäßige Beanspruchung“ nicht in allen Definitionen zu finden. Diese Unterschiede können im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit zur Sicherheit und Sicherung von HRQ (z. B. beim grenzüberschreitenden Verkehr sowie bei Quellen-Datenbanken und -Statistiken) relevant sein.

In unserer *Studie über die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung von HRQ durch alternative Technologien in Deutschland* verwenden wir den Begriff des umschlossenen radioaktiven Stoffs gemäß der Definition des Strahlenschutzgesetzes [1].

2.2. Kategorisierung umschlossener radioaktiver Stoffe

Radioaktive Stoffe werden gemäß den IAEA Safety Standards [6] anhand ihrer Aktivität in fünf Gefährdungskategorien eingeordnet. Dazu sind von der IAEA nuklidspezifische Aktivitätswerte festgelegt worden, die ein Maß für die Gefährlichkeit darstellen, die sogenannten D-values oder D-Werte [7].

In der Tabelle 2 sind je Kategorie die zugehörigen Verhältnisse zwischen der Aktivität (A) und dem D-Wert angegeben [6]. Damit lässt sich die Gefährdungskategorie für eine gegebene Aktivität eines radioaktiven Stoffs bestimmen.

Tabelle 2: Gefährdungskategorie nach den IAEA Safety Standards [6]

Kategorie	Aktivitätsverhältnis		
1		A/D	≥ 1000
2	1000	> A/D	≥ 10
3	10	> A/D	≥ 1
4	1	> A/D	≥ 0,01
5	0,01	> A/D	

Radioaktive Stoffe der Kategorien 1 bis 3 können demnach beim Menschen schwerwiegende deterministische Schäden verursachen, wenn sie unkontrolliert – das heißt z. B. ohne Abschirmung – verwendet werden⁴. Diese pauschale Einstufung ist kein absolutes Mittel, um die Gefährdung durch radioaktive Stoffe zu beschreiben, denn offensichtlich ist ein Schaden nicht allein abhängig von der Aktivität, sondern auch noch von der Expositionsdauer, der Entfernung (bei Direktstrahlung) und der Möglichkeit, den Stoff zu inkorporieren. Dennoch ist diese Zuordnung aus unserer Sicht hilfreich und sinnvoll für eine grobe Einschätzung des relativen Gefährdungspotentials. Die D-Werte wurden auf Basis von bestimmten Expositionsszenarien ermittelt, die aus vergangenen Erfahrungen und möglichen bewussten Sabotagen mit radioaktiven Stoffen entwickelt wurden [7].

2.3. HRQ-Erfassung in Deutschland

Gemäß dem im Jahr 2000 erstmals veröffentlichten *IAEA Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources* [8] sollen die Mitgliedsstaaten ein nationales Register für radioaktive Quellen etablieren⁵. Dies wurde auch später als Forderung in den IAEA Safety Standards [9] aufgenommen. In Europa wurden erstmals 2003 durch die sogenannte HASS-Direktive⁶ 2003/122/EURATOM [10] einheitliche Anforderungen zur Kontrolle von HRQ verbindlich festgelegt⁷.

Daraufhin wurde das deutsche Strahlenschutzrecht durch das HRQ-Gesetz [11] ergänzt, in dem die Einrichtung eines bundesweiten Registers für HRQ festgelegt wird. Dieses beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) geführte Register soll eine lückenlose Verfolgung von HRQ in Deutschland gewährleisten, indem die Betreiber den Erwerb, die regelmäßigen Kontrollen und die Abgabe jeder einzelnen HRQ melden. Auch der Verlust oder Fund einer HRQ müssen diesem Register mitgeteilt

⁴ "The D-value is the activity of a radionuclide in a source that if uncontrolled might result in an emergency that could reasonably be expected to cause severe deterministic health effects." [7]

⁵ "Every state should establish a national register of radioactive sources. This register should, as a minimum, include Category 1 and 2 radioactive sources." [8]

⁶ HASS = High Activity Sealed Source

⁷ Die Richtlinie 2003/122/EURATOM ist – zusammen mit einigen weiteren EU-Richtlinien – mittlerweile ersetzt durch die umfassende Richtlinie 2013/59/EURATOM [3].

werden. Die (anonymisierten) Daten aus diesem HRQ-Register bilden eine wichtige Grundlage für die hier vorliegende *Übersicht über die Anwendungsbereiche von hochradioaktiven Strahlenquellen*.

Mit dem Ziel einer internationalen Harmonisierung und damit eines vereinfachten Datenaustausches sind sowohl in der EU-Richtlinie 2013/59/EURATOM [3] als auch in der seit 2018 gültigen StrlSchV [2] die nuklidspezifischen Aktivitätsgrenzen, ab denen ein umschlossener radioaktiver Stoff eine HRQ ist, identisch mit den oben beschriebenen D-Werten. Als das nationale HRQ-Register im Zuge des HRQ-Gesetzes [11] seinen Betrieb aufgenommen hat, galten allerdings noch die „alten“ HRQ-Grenzen, die sich noch bis Ende des Jahres 2018 an den A₁-Werten des ADR⁸-Übereinkommens [12] orientierten (vgl. dazu Tabelle 1). Die Quellen, die bis Ende 2018 noch als HRQ definiert waren, jedoch heute nicht mehr als HRQ gelten, verbleiben allerdings nach Auskunft des BfS noch im HRQ-Register, da Datensätze aus dem Register in diesen Fällen nicht entfernt werden.

Ein weiterer Grund, weshalb einige der Quellen im HRQ-Register per Definition keine HRQ mehr sind, ist der radioaktive Zerfall. Denn auch bereits abgeklungene Quellen, deren Aktivität unter die HRQ-Grenze gefallen ist, sind im Register noch miterfasst. Das betrifft insbesondere die HRQ im Anwendungsbereich der Gammaradiographie und der Afterloading-Brachytherapie, bei denen mehrheitlich die im Vergleich zu den übrigen HRQ-Nukliden kurzlebigen Nuklide Se-75 und Ir-192 verwendet werden.

Die beiden oben beschriebenen Effekte sind insbesondere immer dann zu berücksichtigen, wenn Vergleiche mit anderen nationalen oder internationalen Quelldatenbanken (wie z. B. ICSRS⁹) hergestellt werden.

⁸ ADR = Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route

⁹ ICSRS = International Catalogue of Sealed Radioactive Sources and Devices, eine von der IAEA betreute Datenbank mit Herstellerdaten zu HRQ und den Geräten, in denen sie verwendet werden oder verwendet werden können, <https://nucleus.iaea.org/Pages/icsrsd.aspx>

3. Risiken

Wenn man über die Notwendigkeit der Ablösung von HRQ diskutiert, dann müssen vor dem Hintergrund der juristischen Grundsätze *Rechtfertigung* und *Verhältnismäßigkeit* auch die Risiken in den einzelnen Anwendungsbereichen betrachtet und verglichen werden. Die vorliegende Studie dient nicht der absoluten Risikoabschätzung der einzelnen Anwendungen, jedoch sind vor der Darstellung der einzelnen Anwendungsbereiche einige grundsätzliche Betrachtungen zum Thema „Risiko“ sinnvoll. Dadurch können im Abschnitt 4 die einzelnen Anwendungsbereiche zumindest relativ auf ihr Risikopotential hin verglichen werden.

Der Risikobegriff wird gesellschaftlich und auch wissenschaftlich (je nach Fachrichtung) unterschiedlich verwendet. Im Strahlenschutz ist die Definition aus der allgemeinen Normungsarbeit zielführend: „Das Risiko ist die Kombination der Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts und seines Schadensausmaßes. Dabei schließt die Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts die Konfrontation mit einer Gefährdungssituation, das Auftreten eines Gefährdungsereignisses und die Möglichkeit zur Vermeidung bzw. Begrenzung des Schadens ein.“ [13]

Neben dieser sehr allgemeinen und technischen Definition wird speziell im Strahlenschutz der Risikobegriff jedoch zusätzlich auch bei der Betrachtung von Dosis-Wirkungsbeziehungen verwendet. Zudem ist der Begriff *Strahlenrisiko* in der öffentlichen Wahrnehmung und der gesellschaftlichen Debatte sehr unterschiedlich besetzt¹⁰. Wir gebrauchen im Rahmen dieser Studie den Risikobegriff jedoch ausschließlich im Sinne der o. g. technischen Definition.

Bei der Betrachtung von Risiken, die von HRQ ausgehen, sind prinzipiell zwei verschiedene Expositionsszenarien zu berücksichtigen. Eine unerwünschte Strahlenexposition kann entweder durch eine (unzureichend abgeschirmte) Quelle hervorgerufen werden, deren Umhüllung noch intakt ist, oder durch eine Quelle, deren Umhüllung zerstört ist, wodurch sich das radioaktive Material per Dispersion verbreiten kann. In den USA, wo das Risiko durch radiologische Waffen nach den Anschlägen vom 11. September 2001 neu bewertet wurde¹¹, haben sich für diese beiden Gefahrenszenarien die Begriffe „Radiological Exposure Device“ (RED) und „Radiological Dispersal Device“ (RDD) etabliert¹².

3.1. Radiological Exposure Device

Ein typischer Fall eines RED ist eine verlorene, vergessene oder gestohlene Quelle, die unbemerkt und meist ungewollt eine signifikante Strahlenexposition verursacht. Aktuelle Beispiele¹³ hierfür sind die vermutlich aus Westafrika stammenden und Anfang 2019 in Rotterdam sowie Hamburg gefundenen Co-60-Quellen. Das Risiko einer unerwünschten Exposition durch ein solches RED ist umso größer je mobiler eine Quelle ist, je schlechter sie gekennzeichnet ist und je schlechter sie gegen Diebstahl geschützt ist.

Neben der Nutzung alternativer Technologien, die im Rahmen dieser Studie noch beschrieben werden, bieten verschiedene andere Maßnahmen Schutz vor REDs, die an dieser Stelle kurz erwähnt, aber nicht

¹⁰ Eine ausführliche Betrachtung von Risiken im Strahlenschutz und deren Wahrnehmung in der Öffentlichkeit hat die Strahlenschutzkommission nach einer Klausurtagung des Ausschusses „Strahlenrisiko“ veröffentlicht [35].

¹¹ Eine Übersicht über Risiken radiologischer Waffen wurde beispielsweise im Report „Radiological Weapons: How Great Is The Danger?“ des *Lawrence Livermore National Laboratory* dargestellt [34].

¹² Das *US Department of Health & Human Services* bietet unter <https://www.remm.nlm.gov/index.html> in einer *Multimedia Library* Beschreibungen dieser und anderer Begriffe des radiologischen Notfallschutzes an. Im Hinblick auf eine fachgerechte und allgemeinverständliche Öffentlichkeitsarbeit durch die staatlichen Behörden kann diese Internetseite ein positives Vorbild vielleicht auch für Deutschland sein.

¹³ IAEA, Nuclear Events Web-based System: <https://www-news.iaea.org/EventList.aspx>

näher als Teil dieser beauftragten Studie untersucht werden sollen. Auf der technischen Seite ist hier vor allem die Möglichkeit des Trackings von umschlossenen radioaktiven Quellen über ein globales Navigationssatellitensystem¹⁴ zu nennen. In der Transport- und Logistikbranche gibt es bereits etablierte und zum Teil vom Bundesamt für Güterverkehr geförderte Satellitenortungstechnik, um Diebstähle zu vermeiden bzw. zu erschweren¹⁵. Auf der administrativen Seite sei auf die Anforderung im *IAEA Code of Conduct* [8] verwiesen, dass jeder Staat ein Aufsichtssystem zur Kontrolle radioaktiver Quellen von ihrer Produktion bis zu ihrer Entsorgung etabliert. Die IAEA hat dazu aktuell mehrere hilfreiche Normen und Anleitungen veröffentlicht [14] [15] [16] und flankiert diese mit regelmäßigen Konferenzen und Workshops¹⁶.

3.2. Radiological Dispersal Device

Das klassische Beispiel für ein RDD ist die sogenannte „schmutzige Bombe“, also ein radioaktiver Stoff, der mittels eines konventionellen Sprengsatzes über einen großen Bereich verteilt wird.

Bei diesem Beispiel werden kriminelle Tätigkeiten vorausgesetzt. Aber es gibt auch Vorkommnisse, in denen die Umhüllung einer HRQ unbeabsichtigt zerstört und dadurch der radioaktive Stoff weiträumig verteilt wurde. Ein gut dokumentierter Fall in Deutschland ist die in einem Betrieb für Gammadiagnostik versehentliche Beschädigung einer Se-75-HRQ im Dezember 2016. Das dabei im Großraum Düsseldorf freigesetzte Se-75 konnte in Spuren sogar noch auf der Insel Fehmarn festgestellt werden¹⁷. Diese Freisetzung war in diesem Umgebungsradius zwar radiologisch nicht relevant, dieser Fall zeigt jedoch, dass bei dispersionsfähigen radioaktiven Stoffen das Risiko prinzipiell nicht lokal begrenzt ist.

Bei der Risikoabschätzung eines RDD sind selbstverständlich die gleichen Themen wie bei einem RED zu betrachten: Mobilität, Kennzeichnung und Diebstahlschutz. Zusätzlich ist jedoch das Potential zur Dispersion zu berücksichtigen. Dies hängt sowohl von der physikalischen als auch von der chemischen Form des radioaktiven Stoffs ab.

¹⁴ NAVSTAR GPS (USA), GLONASS (Russland), Galileo (EU), Beidou (China)

¹⁵ Im Rahmen des Förderprogramms „De-minimis“ werden Unternehmen des Güterkraftverkehrs mit schweren Nutzfahrzeugen vom Bundesamt für Güterverkehr gefördert, verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung von Sicherheit und Umwelt durchführen; darunter sind auch Maßnahmen zum Diebstahlschutz:
https://www.bag.bund.de/DE/Navigation/Foerderprogramme/Deminimis/deminimis_node.html

¹⁶ Beispiel: das jährliche Treffen der *Working Group on Radioactive Source Security* des *Department of Nuclear Safety and Security* (seit 2012)

¹⁷ Dieses und weitere Vorkommnisse mit umschlossenen Strahlenquellen wurden im Schwerpunktthema *Vorkommnisse und Unfälle mit Strahlenquellen – Was passiert und wie gehen wir damit um?* der Zeitschrift *Strahlenschutzpraxis* (Heft 02/2018) ausführlich beschrieben.

4. Anwendungsbereiche

Radioaktive Stoffe und im speziellen auch HRQ werden in vielfältigen Disziplinen der Medizin, Forschung und Industrie verwendet. Für die folgende Untersuchung der Anwendungsbereiche in Deutschland haben wir auf die Daten des nationalen HRQ-Registers zurückgegriffen. Das Bundesamt für Strahlenschutz hat uns die Daten über die Erstmeldung von Strahlenquellen zur Verfügung gestellt¹⁸. Dabei wurden vom BfS vorher diese Daten in Bezug auf die Genehmigungsinhaber anonymisiert und in 30 Branchen einsortiert. Wir haben diese Branchen zu 10 Anwendungsbereichen zusammengefasst (siehe Anhang zu diesem Bericht).

Wie im Abschnitt 2.3 bereits beschrieben, liegt die Aktivität bei vielen Quellen aufgrund des radioaktiven Zerfalls bzw. wegen der Anhebung der HRQ-Grenzwerte unterhalb der aktuellen HRQ-Grenzwerte, so dass diese Strahler per Definition keine HRQ mehr sind. Daher haben wir in einem ersten Schritt diese Quellen aussortiert¹⁹.

Dies entspricht jedoch nicht der Gesamtzahl aller in Deutschland aktuell verwendeten HRQ, denn je HRQ liegen häufig mehrere Erstmeldungen im Register vor (z. B. eine vom Hersteller, eine vom Anwender und eine vom Entsorgungsbetrieb). Für unsere Studie sind jedoch nur diejenigen Quellen von Interesse, die aktuell bei einem Anwender in Verwendung und noch nicht entsorgt sind, da diese möglicherweise durch alternative Technologien ersetzt werden können.

In einem zweiten Schritt haben wir daher diejenigen Erstmeldungen aussortiert, die von einem Hersteller oder einem Entsorgungsbetrieb eingegeben wurden. Zudem haben wir in diesem Schritt diejenigen Quellen aussortiert, die sowohl von einem Anwender als auch von einem Entsorgungsbetrieb gemeldet wurden. Schließlich wurden auch noch die doppelt von einem Anwender eingegebenen Erstmeldungen von Quellen aussortiert.

In Abbildung 1 ist die Verteilung dieser Quellen auf die verschiedenen Anwendungsbereiche dargestellt. Die Bereiche „Großkammerbestrahlung“ und „Teletherapie“ enthalten die meisten HRQ.

¹⁸ Stand vom 26.02.2019

¹⁹ Bei 0,7 % der Erstmeldungen wurde kein Herstellungs- oder Bezugsdatum angegeben. Eine Berechnung der aktuellen Aktivität ist bei diesen Quellen somit nicht möglich. Diese Quellen weisen bzgl. ihrer Aktivität und ihres Nuklids keine Besonderheiten auf. Aus diesen Gründen und aufgrund des sehr geringen Anteils an der Gesamtzahl wurden diese Quellen ebenfalls aussortiert. Dadurch wird die Unsicherheit in den folgenden statistischen Betrachtungen minimiert und die Ergebnisse besitzen einer bessere Nachvollziehbarkeit.

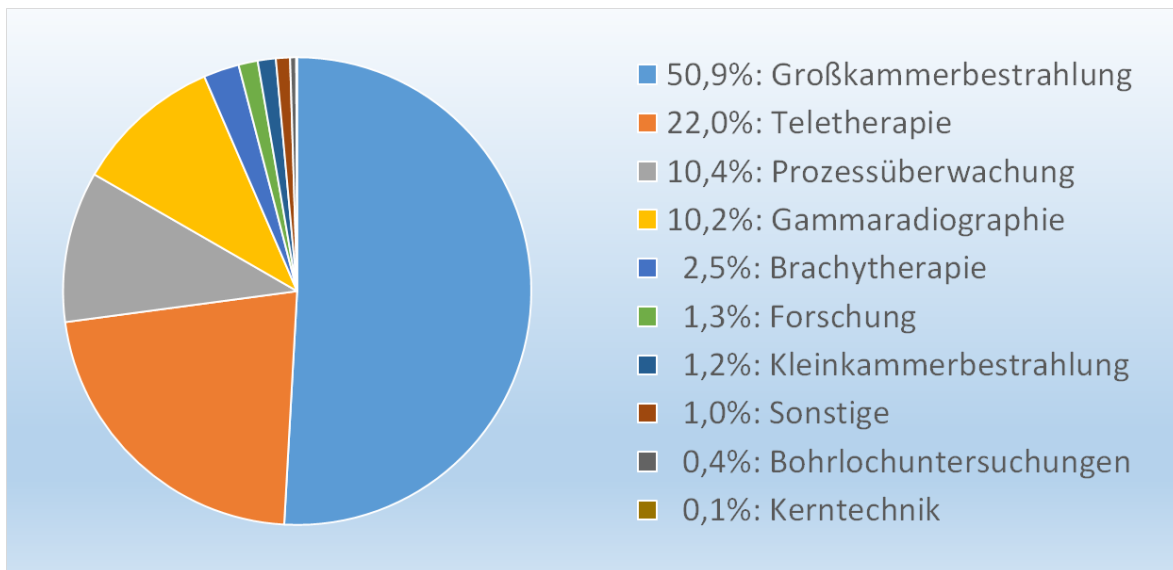


Abbildung 1: Anteil der HRQ in den verschiedenen Anwendungsbereichen

Allerdings ist dabei zu beachten, dass in Großkammerbestrahlungsanlagen ausschließlich Co-60-Quellen mit ca. 500 Quellen pro Anlage verwendet werden. Im Bereich Teletherapie sind fast ausschließlich Co-60-Quellen mit ca. 200 Quellen pro Gerät im Einsatz. In den anderen Anwendungsbereichen enthalten die Geräte bzw. Anlagen üblicherweise nur eine Quelle.

Im Hinblick auf mögliche alternative Technologien ist folglich zu beachten, dass mit dem Wegfall nur eines Teletherapiegeräts oder nur einer Großbestrahlungsanlage hunderte HRQ entfallen. In der Abbildung 2 ist daher die Verteilung der Quellen noch einmal dargestellt; diesmal allerdings sind die Co-60-Quellen in den beiden o.g. Anwendungsgebieten pauschal um den Faktor 500 (Großkammerbestrahlung) bzw. um den Faktor 200 (Teletherapie) reduziert.

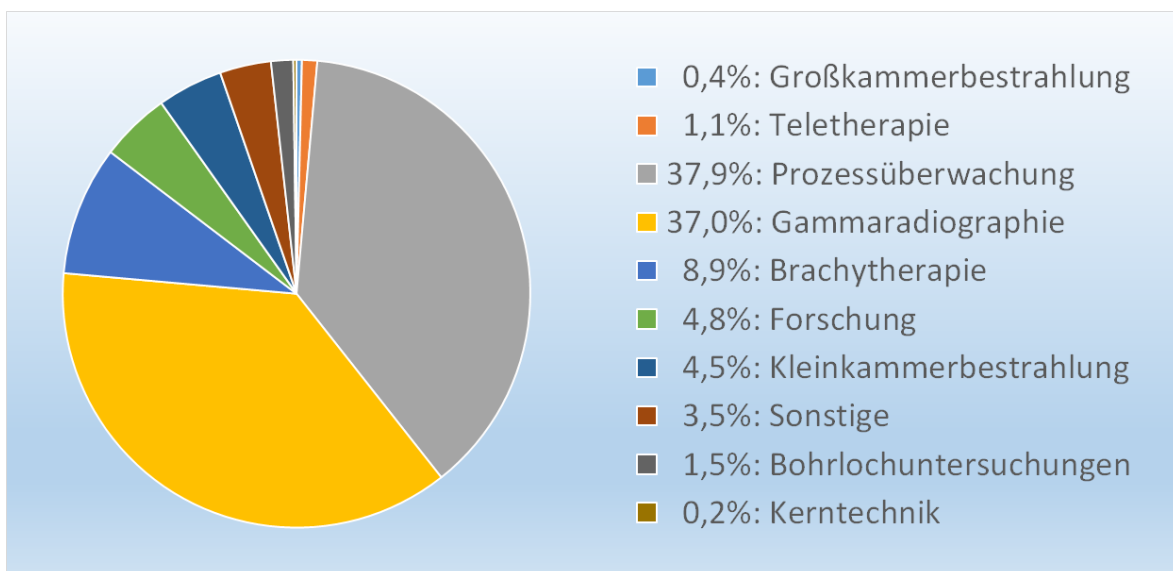


Abbildung 2: Anteil der HRQ in den verschiedenen Anwendungsbereichen, bereinigt um Anlagen mit mehr als 3 Co-60-Quellen

Die meisten Geräte bzw. Anlagen mit HRQ sind demnach in den Bereichen Prozessüberwachung und Gammarradiographie zu finden.

Je nach Anwendungsbereich sind unterschiedliche Nuklide mit unterschiedlichen Eigenschaften im Einsatz. Eine Übersicht mit den je nach Anwendungsbereich typischen Nukliden und Aktivitäten bietet die Tabelle 3. Als typische Nuklide haben wir dabei diejenigen betrachtet, die an der Gesamtzahl der im jeweiligen Anwendungsbereich verwendeten HRQ einen Anteil von mindestens 15 % haben. Die Anwendungen werden anschließend in den Abschnitten 4.1 bis 4.10 einzeln beschrieben und die jeweiligen Besonderheiten im Hinblick auf die Risiken (vgl. Abschnitt 3) untersucht.

Studien in anderen Ländern zum Thema „Alternativen zur Verwendung von HRQ“ (z. B. [17]) gruppieren die Quellen in ähnliche Anwendungsbereiche mit ähnlichen typischen Merkmalen. Die Verwendung von HRQ in Deutschland und in anderen Ländern unterscheidet sich also kaum.

Nach unserem Kenntnisstand gibt es auch keine zusätzlichen Anwendungsbereiche, in denen aufgrund von neuen technischen Entwicklungen in näherer Zukunft HRQ verwendet werden.

Tabelle 3: Anwendungsgebiete und typische Eigenschaften von Hochradioaktiven Strahlenquellen

Anwendung	Typ. Nuklide	Typ. Aktivitäten je Quelle in GBq	Typischer Verwendungszweck
Großkammerbestrahlung	Co-60	370 000	Sterilisation, Vernetzung
Teletherapie	Co-60	1 000	Strahlentherapie
Prozessüberwachung	Cs-137	185 bis 1 850	Messungen von Füllstand, Dicke, Feuchtigkeit oder Durchfluss
	Am-241	111 bis 185	
Gammarradiographie	Se-75	3000 bis 7400	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
	Ir-192	1500 bis 5000	
Brachytherapie	Ir-192	370	Strahlentherapie
Forschung	Co-60	50 bis 15 000	Forschung
	Sr-90	2 000	
	Cs-137	200 bis 50 000	
Kleinkammerbestrahlung	Cs-137	30 000 bis 120 000	Sterilisation
Bohrlochuntersuchungen	Am-241/Be	185	Untersuchung von Lagerstätten

4.1. Großkammerbestrahlung

In der produzierenden Industrie gibt es einen hohen Bedarf an Anlagen, die in kurzer Zeit Produkte sterilisieren oder auch (zur Veredelung von Kunststoffen) vernetzen können. Dies kann u. a. durch die Exposition mit Gammastrahlung erfolgen. In Großkammerbestrahlungsanlagen können Produkte palettenweise und ohne Umpackungsschritte bestrahlt werden, indem sie in einem Bestrahlungsbunker automatisch an einer Wand mit Co-60-HRQ vorbeigeführt werden. Dies ermöglicht einen hohen Warendurchsatz und ein einfaches Logistikkonzept.

In Großkammerbestrahlungsanlagen werden ausschließlich Co-60-Quellen verwendet. Die typische Quellenaktivität von 370 TBq ergibt bei bis zu 500 Quellen je Anlage eine Gesamtaktivität von 185 PBq. Bedingt durch die Halbwertszeit von Co-60 werden jedoch mehrmals pro Jahr einige Quellen einer Anlage ausgetauscht, so dass in einer Anlage niemals alle Quellen die maximale Aktivität besitzen.

4.2. Teletherapie

Bevor sich die Teletherapie mit Linearbeschleunigern als Standardverfahren für die Strahlentherapie durchsetzte, waren sogenannte Kobaltkanonen der Stand der Technik in diesem Bereich. Dabei wurde eine Co-60-HRQ, die sich am Ende einer drehbaren Gantry befand und die während der Bestrahlung hinter einer Abschirmung automatisch hervorgeschoben wurde, zur Bestrahlung verwendet. Derartige Geräte gibt es in Deutschland kaum noch²⁰. Die Bestrahlung mit Linearbeschleunigern hat den Einsatz von Kobaltkanonen in Deutschland abgelöst, da die Dosisverteilung im Patienten damit wesentlich präziser und medizinisch wirkungsvoller erfolgen kann.

Doch bei einer sehr speziellen Anwendung werden Co-60-HRQ heute wieder zur Strahlentherapie in Deutschland eingesetzt: die Stereotaxie im Kopf-Hals-Bereich. Der einzige Gerätetyp ist das von der schwedischen Fa. Elekta hergestellte GammaKnife®, in dem sich 192 Co-60-Quellen mit je einem Kollimator befinden. So kann eine sehr hohe Dosis in einem sehr kleinen Fokuspunkt erzeugt werden.

Die verwendeten Quellen haben eine typische Anfangsaktivität von jeweils 1,2 TBq und werden üblicherweise nach fünf Jahren ersetzt.

4.3. Prozessüberwachung

Im Bereich der Prozessüberwachung sind umschlossene radioaktive Stoffe und darunter auch HRQ vielfältig im Einsatz. Dabei wird entweder die Abschirm- oder die Rückstreueigenschaft eines Materials mittels ionisierender Strahlung gemessen. Damit können verschiedene für den Produktionsprozess entscheidende physikalische Größen kontaktlos und in Echtzeit ermittelt werden. Weitverbreitete Anwendungen sind z. B. Füllstandsmessungen an Kesseln oder Silos, Dicken- und Flächengewichtsmessungen an Papier, Glas, Folien oder Blechen, Feuchtigkeitsmessungen an Schüttgütern sowie Durchflussmessungen an Transportleitungen. Hohe Aktivitäten im HRQ-Bereich werden bei Füllstandsmessungen und Dicken-/Flächengewichtsmessungen eingesetzt.

²⁰ In vielen Entwicklungs- und Schwellenländern ist diese Form der Teletherapie jedoch noch weit verbreitet. Eine detaillierte, weltweite Übersicht über alle Formen von Strahlentherapie-Einrichtungen stellt die IAEA in einer frei zugänglichen Datenbank zu Verfügung: DIRAC (Directory of RAdiotherapy Centres), <https://dirac.iaea.org/>

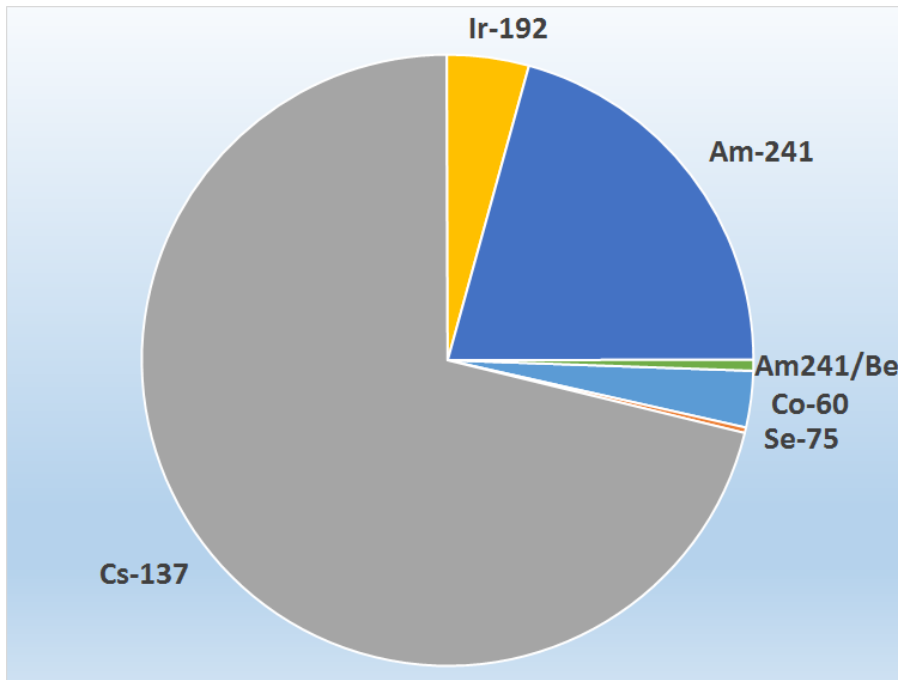


Abbildung 3: Nuklidverteilung von HRQ im Bereich Prozessüberwachung

Wie in der Abbildung 3 und in Tabelle 3 bereits dargestellt enthalten HRQ in der Prozessüberwachung hauptsächlich die Nuklide Cs-137 und Am-241. Beide Nuklide haben im Vergleich zu den anderen typischen HRQ-Nukliden relativ lange Halbwertszeiten, so dass ein Austausch der Quellen aufgrund des radioaktiven Zerfalls meist frühestens nach Jahrzehnten erfolgen muss. Zudem kann die Kalibrierung der zugehörigen Strahlungsdetektoren (in einem begrenzten Umfang) nachgeregelt werden, um den Signalverlust durch den radioaktiven Zerfall zu kompensieren.

4.4. Gammaradiographie

Anhand von Abbildung 2 ist zu erkennen, dass ein großer Teil der in Deutschland verwendeten HRQ zur Gammaradiographie eingesetzt werden. Geräte für die Gammaradiographie werden in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung verwendet, um beispielsweise Material- oder Schweißnahtfehler in metallischen Bauteilen sichtbar zu machen. Dazu wird eine HRQ meist mittels einer händisch betriebenen Fernbedienung aus einem Gammaradiographiegerät innerhalb eines Ausfahrtschlauchs herausgeschoben und nach dem Einsatz ebenso wieder in das Gerät zurückgezogen.

Dabei werden je nach Abschirmfähigkeit des Bauteils unterschiedliche Energiebereiche der Photonenstrahlung genutzt, um hochaufgelöste Durchstrahlungsaufnahmen zu erhalten. Neben der Verwendung von Röntgenanlagen (mit relativ energiearmer Photonenstrahlung im unteren bis mittleren keV-Bereich) und Linearbeschleunigern (mit relativ energiereicher Photonenstrahlung im unteren MeV-Bereich) werden Durchstrahlungsprüfungen unter Verwendung der Nuklide Co-60, Se-75, Cs-137 und Ir-192 (im mittleren bis hohen keV-Bereich) durchgeführt. Die mit Abstand²¹ am häufigsten verwendeten Nuklide sind Se-75 mit einer typischen Aktivität zwischen 3,0 und 7,4 TBq sowie Ir-192 mit einer typischen Aktivität von 1,5 bis 5,0 TBq. Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der in der Gammaradiographie eingesetzten Nuklide.

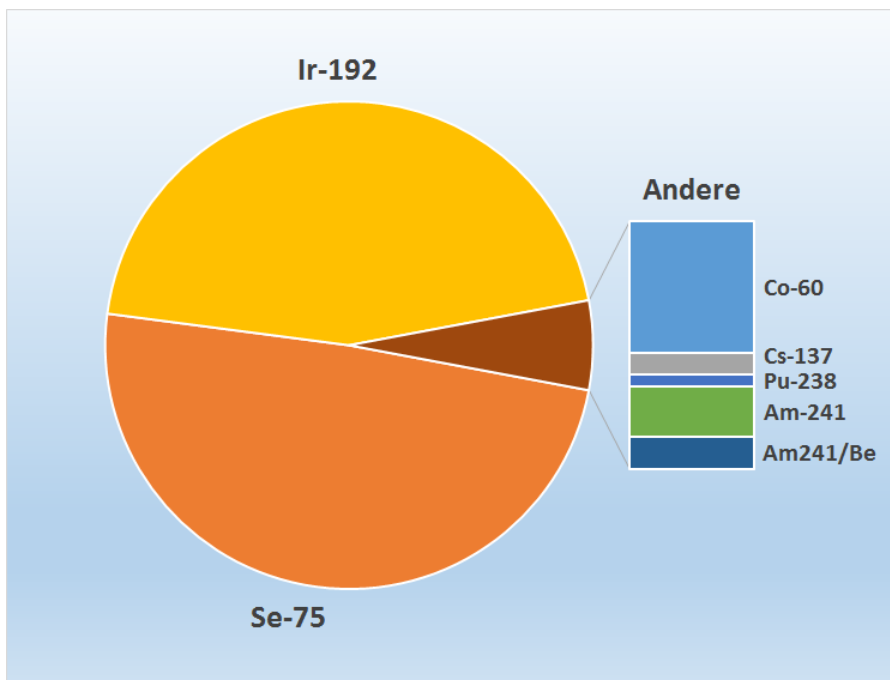


Abbildung 4: Nuklidverteilung von HRQ im Bereich Gammaradiographie

²¹ ca. 94 %

4.5. Brachytherapie

In der High-Dose-Rate-Brachytherapie als Teilgebiet der Strahlentherapie werden HRQ in sogenannten Afterloading-Geräten²² zur Behandlung von Tumoren eingesetzt. Dabei wird eine umschlossene Strahlenquelle für eine definierte Zeit in unmittelbarer Nähe²³ des zu bestrahlenden Gewebes gebracht, um die geplante Dosis im Zielvolumen zu applizieren. Typische Ziele sind Tumore in der Prostata, der Brust, der Speiseröhre sowie im HNO-Bereich und im gynäkologischen Bereich.

In Deutschland werden zur Brachytherapie in Afterloading-Geräten fast ausschließlich Ir-192-Quellen mit einer Standard-Aktivität von 370 GBq eingesetzt. Wie bei den Quellen für die Gammadiagnostik ist das Iridium in metallischer Form vorhanden. In Deutschland werden zurzeit neben den 72 Afterloading-Geräten mit dem Nuklid Ir-192 zusätzlich noch sechs Afterloading-Geräte mit dem Nuklid Co-60 betrieben²⁴.

4.6. Forschung

In der Forschung finden HRQ in mehreren Disziplinen Verwendung. In den Bereichen Biologie, organische Chemie und Medizin geht es um die Untersuchung von Dosis-Wirkungsbeziehungen bei Organismen. In den Bereichen Physik und Messtechnik werden beispielsweise die Eigenschaften von Dosismesssystemen untersucht. In der anorganischen Chemie und der Materialforschung werden vorwiegend die Dosis-Wirkungsbeziehungen bei Werkstoffen untersucht.

Ähnlich breit wie das Forschungsspektrum ist auch das Spektrum der verwendeten Nuklide, das in der Abbildung 5 dargestellt ist.

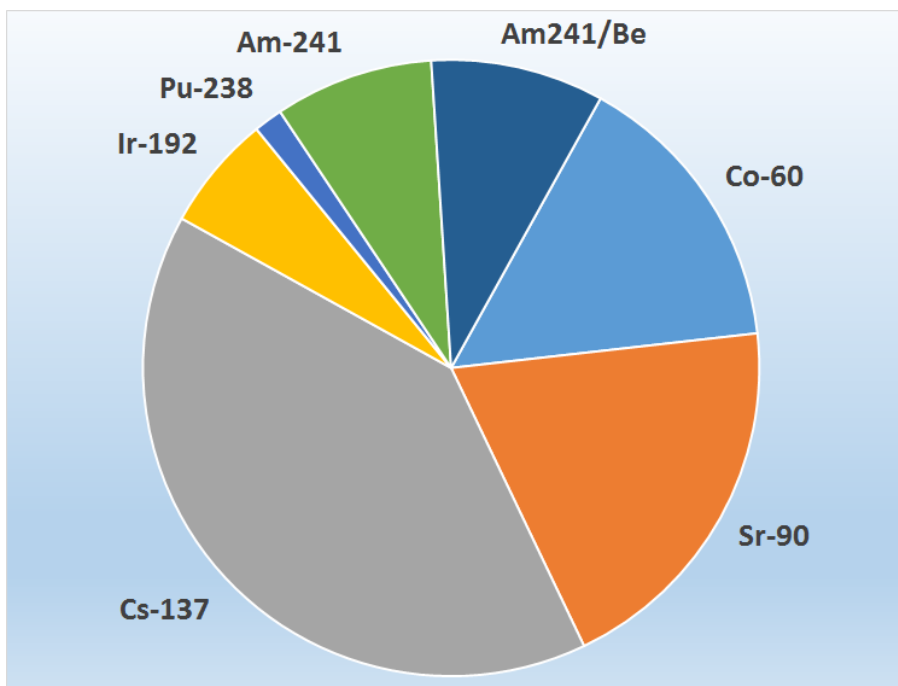


Abbildung 5: Nuklidverteilung von HRQ im Bereich Forschung

²² Bei Afterloading- oder Nachlade-Geräten legt der Arzt einen Zugangsschlauch vom Gerät zum Zielvolumen im Patienten. Nachdem der Arzt den Bestrahlungsraum verlassen hat, wird die an der Spitze eines Drahts befestigte Quelle vom Gerät durch den Schlauch zum Zielvolumen gefahren („nachgeladen“).

²³ „brachys“, altgriechisch für „kurz“ oder „nah“

²⁴ Angaben aus: DIRAC (Directory of RAdiotherapy Centres), <https://dirac.iaea.org/>

4.7. Kleinkammerbestrahlung

Anlagen für Kleinkammerbestrahlungen haben im Gegensatz zu den Großkammerbestrahlungsanlagen ein relativ kleines Volumen, das bestrahlt wird. Es reicht je nach Hersteller und Anlage von 0,8 bis zu 64 Liter. Die meisten Anlagen werden zur Sterilisation von Blut bzw. Blutkomponenten verwendet²⁵. Daneben gibt es Anlagen, in denen zu Forschungszwecken²⁶ Kleintiere, Zellkulturen und weitere organische Materialien bestrahlt werden.

Diese Bestrahlungsanlagen arbeiten fast ausschließlich mit dem Nuklid Cs-137. Eine Anlage enthält ein bis drei Cs-137-Quellen mit einer typischen Gesamtaktivität zwischen 30 und 120 TBq.

4.8. Bohrlochuntersuchungen

Im Bereich Bohrlochuntersuchungen sind nur verhältnismäßig wenige HRQ im Einsatz. Doch sowohl die Anwendungstechnik als auch der Anwendungszweck dieser Quellen ist derart speziell, dass sich gerade im Hinblick auf mögliche Alternativtechnologien eine Untersuchung dieses Bereiches lohnt.

HRQ werden bei Bohrlochuntersuchungen hauptsächlich²⁷ als Neutronenquellen in Form von Am-241/Be-Gemischen verwendet. Mit der Neutronenstrahlung und den dadurch induzierten Photonen²⁸ lassen sich mittels Rückstreuung Erkenntnisse über Bohrlöcher, Kavernen und das umliegende Gestein ermitteln, z. B. in Bezug auf die Porosität, auf den Feuchtigkeitsgehalt, auf den Wasserstand oder allgemein auf den Wasserstoffanteil.

4.9. Kerntechnik

Gemäß den Angaben im HRQ-Register befinden sich im Bereich der Kerntechnik sechs hochradioaktive Quellen in Deutschland im Einsatz: 1x Co-60, 2x Cs-137 und 3x Am-241/Be. Angaben zum genauen Verwendungszweck finden sich dort allerdings nicht. Nach unserem Kenntnisstand werden einige dieser Quellen als Anfahrquellen für die Kernspaltung (Am-241/Be) und einige als Kalibrierquellen für Messgeräte (Co-60, Cs-137) verwendet.

4.10. Sonstige Anwendungen

Wie in Abbildung 1 erkennbar ist, gibt es knapp 100 Erstmeldungen im nationalen HRQ-Register, die keinem konkreten Anwendungsgebiet zugeordnet werden konnten. Bei mehr als zwei Drittel dieser Meldungen konnte das BfS die Branche nicht spezifizieren und hat diese mit „?“ gekennzeichnet (siehe Anhang zu diesem Bericht). Die weiteren Angaben zum Nuklid, zur Aktivität, zum Quellentyp sowie zu den physikalischen bzw. chemischen Merkmalen weisen auch keine Besonderheiten auf und lassen nicht eindeutig auf einen bestimmten Anwendungsbereich schließen. Diese Quellen werden daher in unserer Studie nicht weiter betrachtet.

²⁵ Um bei Bluttransfusionen die Gefahr von unerwünschten Abwehrreaktionen („Graft-versus-Host-Reaktionen“ oder „Transplantat-gegen-Wirt-Reaktionen“) zu minimieren, werden die Blutkomponenten mit üblicherweise einmalig 30 Gy bestrahlt.

²⁶ meist im Hinblick auf Dosiswirkungsbeziehungen

²⁷ ca. 76 %

²⁸ (n,γ)-Prozesse

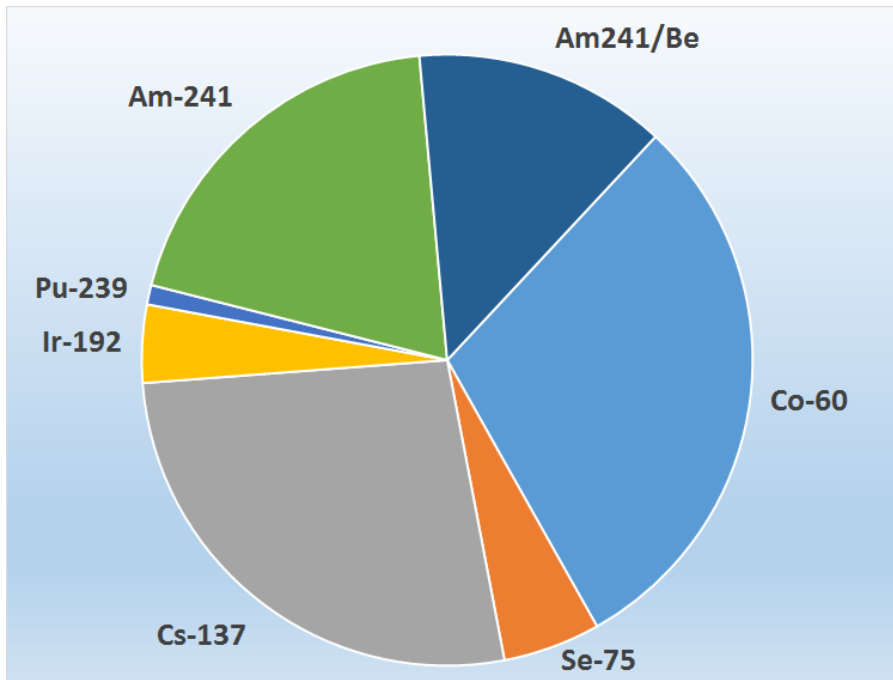


Abbildung 6: Nuklidverteilung von HRQ im Bereich der sonstigen Anwendungen

5. Alternative Technologien

In den im Abschnitt 4 beschriebenen Anwendungsgebieten gibt es alternative Technologien, die entweder ohne radioaktive Stoffe auskommen oder die ein geringeres Risiko in Bezug auf Diebstahl- oder Dispersionspotential besitzen. Dabei müssen innerhalb jedes Anwendungsgebietes jedoch die detaillierte Zielsetzung und die genauen Umstände der einzelnen Anwendung von HRQ betrachtet werden, da hiervon die Bewertung der alternativen Technologien abhängt.

In den folgenden Abschnitten untersuchen wir für das jeweilige Anwendungsgebiet die möglichen alternativen Technologien. Dabei stellen wir die für einen Vergleich notwendigen Spezifikationen, die aktuelle Verfügbarkeit auf dem deutschen Markt und die Kriterien für einen späteren Vergleich zwischen der HRQ-Technologie und der alternativen Technologie dar. Zudem erläutern wir die Quellen unserer Untersuchungserkenntnisse, um die zum Teil gegenläufigen ökonomischen und technischen Interessen zu erläutern, die bei der Entscheidung eines Anwenders oder Herstellers für oder gegen eine alternative Technologie relevant sind.

Ein abschließender Vergleich der unterschiedlichen Technologien erfolgt dann im Abschnitt 6.

5.1. Großkammerbestrahlung

Großkammerbestrahlungsanlagen mit Co-60-Quellen werden hauptsächlich zur Sterilisation von Produkten verwendet. Prinzipiell können diese Anlagen auch zur Vernetzung von Kunststoffen verwendet werden. Allerdings werden zur Strahlenvernetzung im industriellen Maßstab aufgrund der höheren Wechselwirkungsdichte fast ausschließlich Elektronenstrahlung und UV-Strahlung genutzt. Für eine typische Dosis von 100 kGy benötigt man mit Co-60-Quellen einige Tage, mit Röntgenstrahlung einige Stunden und mit Elektronenstrahlung einige Minuten [19]. UV-Strahlung kann wegen der geringen Eindringtiefe nur bei der Vernetzung dünner Schichten (Lacke, Beschichtungen etc.) verwendet werden; hierbei ist die Bestrahlung mit Co-60-Quellen aufgrund der hohen Eindringtiefe ungeeignet [19]. Aus diesen Gründen werden Großkammerbestrahlungsanlagen mit Co-60-Quellen kaum zur Vernetzung von Kunststoffen verwendet. Daher werden wir im Folgenden dieses Anwendungsgebiet nicht weiter betrachten und uns auf das Gebiet der Sterilisation fokussieren.

Für die Sterilisation von Produkten im industriellen Maßstab gibt es neben der Bestrahlung auch noch die Möglichkeiten der thermischen (Dampf- oder Heißluft-) Sterilisation und der chemischen Sterilisation (Nassantiseptik mit Flüssigkeiten oder Trockenantiseptik mit Gasen). Aber auch innerhalb der Bestrahlungstechnik gibt es neben der Anwendung mit Co-60-Quellen zudem noch die Bestrahlung mit Elektronen (bis zu 10 MeV) und mit Photonenstrahlung (bis zu 7 MeV).

Die mit Abstand häufigsten Arten, (Einweg-) Produkte im industriellen Maßstab zu sterilisieren, sind Bestrahlungen mit Co-60-Quellen, mit Elektronenbeschleunigern (hauptsächlich für Oberflächen) und mit Beschleunigeranlagen zur Erzeugung hochenergetischer Photonenstrahlung sowie die Gassterilisation mit Ethylenoxid (EO).

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen der Bestrahlung mit Co-60-Quellen und anderen Sterilisierungstechniken haben wir auf Basis einer Literaturrecherche und insbesondere unter Berücksichtigung des IAEA-Reports zur Bestrahlungssterilisation [20] und des Berichts der GIPA²⁹ und der iia³⁰ [21] ermittelt.

²⁹ Gamma Industry Processing Alliance: <http://gipalliance.net/>

³⁰ International Irradiation Association: <https://iiaglobal.com/>

Produktkompatibilität

Nicht alle Produkte können mit allen o. g. Technologien sterilisiert werden. Gassterilisation ist nur möglich bei gasdurchlässigen Verpackungen und Produkten. Zudem müssen die Produkte dabei Temperaturen bis zu 60° C unbeschadet überstehen können. Sterilisation mittels Bestrahlung ist nur anwendbar bis zu einer maximalen Dichte, da ansonsten die Strahlung zu stark abgeschirmt wird und eine ausreichende Dosis nicht an allen Stellen gewährleistet werden kann. Diese maximale Dichte für die Produkte inkl. Verpackung liegt für Co-60-Strahlung bei 0,4 g/cm³, für Elektronenstrahlung bei 0,25 g/cm³ und für in Beschleunigeranlagen erzeugte Photonenstrahlung bei 0,5 g/cm³ [21].

Produkte mit höheren Dichten könnten zwar auch bestrahlt werden (z. B. durch eine längere Bestrahlungsdauer oder durch eine höhere Aktivität). Aber dann wird das Verhältnis zwischen der maximalen und der minimalen Dosis³¹ innerhalb der bestrahlten Palette zu ungünstig. Denn einerseits muss an allen Stellen der Palette die vorgeschriebene Minstdosis überschritten werden, um die Produkte komplett zu sterilisieren. Andererseits darf auch die (vom Produkt abhängige) Maximaldosis an keiner Stelle der Palette überschritten werden, um unerwünschte Produktbeeinträchtigungen sicher auszuschließen.

Dosishomogenität

Die Dosishomogenität ist somit ein weiteres Bewertungskriterium – zumindest für den Vergleich der verschiedenen Bestrahlungstechnologien. Aufgrund des stetigen Dosisabfalls im bestrahlten Produkt können mit Co-60-Strahlung homogenere Dosistiefenprofile erzeugt werden als mit Elektronenstrahlung [20]. Denn durch die aufgrund der geringen Durchdringungsfähigkeit notwendigen hohen Elektronenenergie von 2,5 bis 10 MeV ergibt sich ein zunächst ansteigendes und dann abfallendes Dosistiefenprofil (Aufbau-Effekt) mit einem Dosismaximum in einigen Zentimetern Tiefe. Auch bei einer Bestrahlung von mehreren Seiten ist die Dosishomogenität bei der Bestrahlung mit Elektronen limitiert.

Mit Beschleunigern erzeugte Photonenstrahlung (Bremsstrahlspektrum mit max. 4 MeV) liefert in Wasser in einigen Zentimetern Tiefe ungefähr das gleiche Dosistiefenprofil wie Co-60-Strahlung (scharfes Linienspektrum). Bei der hochenergetischen Photonenstrahlung gibt es aber den oben beschriebenen Aufbau-Effekt, wodurch das Dosistiefenprofil und damit die erreichbare Dosis-homogenität bei Beschleunigeranlagen etwas geringer ist als bei Co-60-Anlagen.

Möglichkeit der Produktbeeinträchtigung

Produktbeeinträchtigungen können bei allen Sterilisationstechniken auftreten. Bei der Sterilisation mit Ethylenoxid müssen größere Rückstände im Produkt vermieden werden. Grenzwerte hierzu sind in internationalen Normen festgelegt. Bei Bestrahlungen mit hohen Dosen müssen unerwünschte Schädigungen am Produkt oder an der Verpackung verhindert werden. Bei hohen Energien sollten zudem (abhängig von den chemischen Elementen im Produkt) Aktivierungen berücksichtigt werden.

Einmalige und laufende Kosten

Eine ökonomische Gesamtbetrachtung verschiedener Sterilisationstechniken mit den einmaligen Anschaffungskosten und den laufenden Betriebskosten ist bislang in keiner Studie systematisch untersucht worden. Eine Vielzahl an Parametern (Preise, Stückzahlen, Produkthanforderungen, Energiekosten etc.), die zudem zum Teil zeitlichen Schwankungen unterliegen, sind dafür zu analysieren. Eine solche umfassende Betrachtung ist im Rahmen unseres Berichts daher nicht zu leisten.

³¹ das sogenannte DUR, Dose Uniformity Ratio

Allgemein erfordert die Beschleunigertechnik allerdings vergleichsweise hohe Anschaffungsinvestitionen und ist mit hohen Energiekosten verbunden, was durch Anwenderbefragungen bestätigt wurde. Bei Co-60-Anlagen machen hingegen die laufenden Kosten insbesondere durch den regelmäßigen Quellentausch den bedeutenden Anteil an den Gesamtkosten aus.

Volumendurchsatz

Entscheidend für einen ökonomischen Vergleich ist neben den Anschaffungskosten und den laufenden Kosten natürlich der Volumendurchsatz, der von der Packungsgröße und den Prozesszeiten je Packungsgröße abhängt. Für das Volumen eines 45-Fuß-Containers (ca. 85 m³) beträgt die Prozesszeit für eine Sterilisierung mittels Co-60-Strahlung oder Photonenstrahlung weniger als 24 Stunden und mittels Elektronenstrahlung weniger als 8 Stunden; die entsprechende Zeit bei der Verwendung von Ethylenoxid liegt bei mehreren Tagen [21].

Ausfallzeiten und Verfügbarkeit

Ebenfalls ein wichtiges ökonomisches Bewertungskriterium ist die durchschnittliche Ausfallzeit bzw. Verfügbarkeit des jeweiligen Systems. Co-60-Anlagen besitzen im Vergleich zu den anderen Bestrahlungstechniken einen geringen Wartungsaufwand, der meist im Rahmen der routinemäßigen Quellenwechsel durchgeführt werden kann; Reparaturen sind zudem meist in einem Bereich von Stunden durchführbar. Beschleunigeranlagen haben nicht nur einen höheren Wartungsbedarf, Reparaturen können sich aufgrund der komplexeren Technik auch leicht über mehrere Tage erstrecken [21].

Anlagen zur Gassterilisation sind wiederum relativ wartungsarm, zudem können die meisten Reparaturen durch präventive Wartungsmaßnahmen vermieden werden [21].

Sicherheit des Personals

Bei den Bestrahlungstechniken ist vor allem der Schutz vor ionisierender Strahlung bedeutsam. Ein entsprechender baulicher Strahlenschutz in Verbindung mit einem Zugangskontrollsystem kann eine Exposition des Personals im laufenden Betrieb verhindern. Bei Co-60-Anlagen ist eine geringfügige Exposition von Personen während der Quellenwechsel allerdings nicht vollständig zu vermeiden. Dosismonitorsysteme und die Überwachung von Personendosen sind daher absolut notwendig [20].

Ethylenoxid ist hingegen toxisch, krebserregend und hochentzündlich. Mess- und Alarmsysteme, Lüftungsanlagen sowie Zugangskontrollsysteme sind daher für die Sicherheit des Personals unbedingt erforderlich [21].

5.2. Teletherapie

Im Feld der perkutanen, stereotaktischen Strahlentherapie im Kopf-Hals-Bereich sind in Deutschland als Alternativen zu GammaKnife[®]-Geräten Beschleunigeranlagen zweier Typen verfügbar: Protonen- und Elektronenbeschleuniger.

Protonenbeschleuniger für die perkutane Strahlentherapie werden aufgrund des technisch und finanziell vergleichsweise hohen Aufwands zurzeit nur an vier Standorten in Deutschland betrieben³². Eine ständig aktualisierte weltweite Übersicht über Protonentherapieanlagen liefert die non-profit-Organisation PTCOG³³. In Europa etablierte Hersteller sind die Firmen Varian und IBA (in Kooperation mit der Fa. Philips). Protonenbeschleuniger sind in der Fläche (noch) nicht für alle Patienten verfügbar.

³² Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum ([HIT](#)), Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum ([MIT](#)), Westdeutsches Protonentherapiezentrum Essen ([WPE](#)), Universitäts Protonen Therapie Dresden ([UPTD](#))

³³ Particle Therapy Co-Operative Group: <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>

Die Helmholtz-Gemeinschaft erforscht jedoch im Rahmen des ATHENA-Projekts³⁴ die Möglichkeiten von kompakten Protonenbeschleunigern mittels Laser-Plasma-Beschleunigertechnologie³⁵, die eine Patientenversorgung in der Fläche ermöglichen könnten.

Wesentlich verbreiteter sind Elektronenbeschleuniger (ca. 500 Anlagen³⁶), in denen mittels eines wolframhaltigen Targets hochenergetische Photonen zur Strahlentherapie erzeugt werden. Allerdings ist nur ein Teil der Elektronenbeschleuniger fähig, stereotaktische Bestrahlungen in der notwendigen geometrischen Präzision durchzuführen. Genaue Zahlen sind dazu nicht veröffentlicht, aber auf der Basis eigener Schätzungen kann man von einem Drittel stereotaxiefähiger Elektronenbeschleuniger ausgehen (Tendenz steigend, da neuere Anlagen typischerweise die notwendige Präzision besitzen). In Deutschland sind Elektronenbeschleuniger der Firmen Varian und Elekta mit Abstand am weitesten verbreitet.

Die Elektronenbeschleuniger der unterschiedlichen Hersteller unterscheiden sich in Bezug auf die technischen Anforderungen, die Einsatzbedingungen sowie die Leistungsfähigkeit jedoch nicht wesentlich bzgl. der Frage nach möglichen alternativen Technologien für HRQ. Wir differenzieren daher im Folgenden nicht zwischen den Beschleunigeranlagen unterschiedlicher Hersteller.

Die im einzelnen medizinischen Fall angewendete Therapieform (Protonenbeschleuniger, Elektronenbeschleuniger oder GammaKnife®) hängt in Deutschland nicht nur von der medizinischen Bewertung, sondern auch von der Zuweiserstruktur (zwischen der Diagnostik und der Therapie) sowie von der Abrechnungs-/Vertragsstruktur der Krankenkassen zu den einzelnen Therapiezentren ab. Dieser Umstand betrifft allerdings nicht die in dieser Studie grundsätzliche Fragestellung nach möglichen alternativen Technologien zu HRQ und bleibt daher in den folgenden Betrachtungen unberücksichtigt.

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen der GammaKnife®-Technik und der Beschleunigertechnik haben wir auf Basis von Anwenderbefragungen sowie unter Berücksichtigung der HTA³⁷-Berichte des DIMDI [22] und des LBI [23] ermittelt.

Medizinische Effektivität

Die medizinische Effektivität ist beim Vergleich unterschiedlicher Therapiemöglichkeiten natürlich von grundlegender Bedeutung. Die in diesem Bereich zur Verfügung stehenden klinischen Studien sind jedoch vielfach methodisch mangelbehaftet und in den meisten Fällen nicht direkt miteinander vergleichbar, da häufig nur einzelne Therapieerfolgsparemeter (z. B. lokale Tumorkontrolle, Funktionsfähigkeit, Überlebenszeit, Nebenwirkungen, Lebensqualität) untersucht wurden [22].

In klinischen Studien gibt es Hinweise auf die Gleichwertigkeit zwischen der Behandlung mit einem GammaKnife® und der mit einem Elektronenbeschleuniger; diese Hinweise bedeuten jedoch weder einen Nachweis für die Äquivalenz noch für eine Unterschiedlichkeit [23]. In physikalischen Studien zur Dosisverteilung im Kopf-Hals-Bereich gibt es Hinweise darauf, dass die GammaKnife®-Technik bei kleinen Zielvolumina (Einpunktbestrahlungen) und die Elektronenbeschleuniger-Technik bei größeren Zielvolumina vorteilhaft ist [23]. Die Dosisverteilung bei Protonenbeschleunigern ist prinzipiell besser als bei den anderen Bestrahlungstechniken da der lineare Energietransfer bei Protonen wesentlich größer ist als bei Photonen und dadurch die Dosisgradienten wesentlich steiler sind was eine präzisere Bestrahlung des Zielvolumens ermöglicht. Alle Übersichtsstudien und HTA-Berichte halten weitere

³⁴ <https://www.athena-helmholtz.de/>

³⁵ sog. Wakefield Accelerators

³⁶ Angaben aus: DIRAC (Directory of RAdiotherapy Centres), <https://dirac.iaea.org/>

³⁷ HTA = Health Technology Assessment (Medizintechnik-Folgenabschätzung)

klinische Studien für notwendig, um die verschiedenen Applikationsformen von Radiochirurgie zu vergleichen.

Einmalige und laufende Kosten

Neben der medizinischen Effektivität sind die ökonomischen Interessen der Anwender ein wichtiges Entscheidungskriterium zwischen den verschiedenen Technologien. Sowohl GammaKnife®-Geräte als auch Elektronenbeschleuniger liegen im Anschaffungspreis im unteren einstelligen Millioneneurobereich und auch die durchschnittliche Betriebsdauer liegt bei beiden Technologien im Bereich von 15 bis 20 Jahren [23]. Die einmaligen Kosten für die Errichtung des baulichen Strahlenschutzes hängen meist stark von der möglichen Verwendung bestehender Bestrahlungsbunker ab. Die Kosten für einen neuen GammaKnife®-Bestrahlungsraum liegen aufgrund der geringeren maximalen Photonenenergie und der daraus folgenden geringeren notwendigen Abschirmwirkung der Wände und Türen wesentlich unter den Kosten für einen neuen Elektronenbeschleuniger-Bestrahlungsraum.

Bei den laufenden Gerätekosten unterscheiden sich GammaKnife® und Elektronenbeschleuniger grundlegend. Beim GammaKnife® kommen durch den Quellentausch alle fünf Jahre Kosten von etwa einer halben Million Euro hinzu. Hingegen sind die laufenden Wartungskosten bei einem GammaKnife® mit wenigen Zehntausend Euro pro Jahr relativ gering. Bedingt durch die höhere Komplexität der Elektronenbeschleuniger und die daraus folgenden aufwendigeren Wartungen und Reparaturen liegen die jährlichen Kosten für einen Vollwartungsvertrag hier zwischen 100.000 € und 200.000 €. Bei den Betriebskosten wie Strom, Auswertungsmittel für die Qualitätskontrolle (Filme oder Software) und Fixierungsmasken liegen die Kosten bei einem Elektronenbeschleuniger höher als bei einem GammaKnife®; allerdings sind diese Unterschiede im Vergleich zu den anderen o. g. Kostenkomponenten eher gering.

Protonenbeschleuniger sind zurzeit nur als Großbeschleuniger verfügbar, deren Kosten sowohl für die Anschaffung als auch für den laufenden Betrieb um mindestens eine Größenordnung höher sind als bei Elektronenbeschleunigern und beim GammaKnife®.

Behandlungsdauer und Patientendurchsatz

Für einen ökonomischen Vergleich der GammaKnife®-Technik und der Beschleunigertechnik sind jedoch neben der Ausgabenseite auch noch andere Parameter zu betrachten. Entscheidend hierbei sind z. B. die Behandlungsdauer pro Patient, die Vorbereitungszeit pro Patient, der Personaleinsatz, die Ausfallzeiten und die Möglichkeit der multiplen Nutzungsmöglichkeit bei keiner Vollauslastung des Gerätes mit Kopf-Hals-Bestrahlungen.

Ergebnisse ökonomischer Studien deuten darauf hin, dass Kopf-Hals-Bestrahlungen mit GammaKnife®-Geräten günstiger sein können als mit Elektronenbeschleunigern, wenn beide Geräte zu 100 % mit diesen Bestrahlungen ausgelastet sind. Andernfalls kann an einem Elektronenbeschleuniger die freie Zusatzzeit für Bestrahlungen von anderen Körperregionen genutzt werden; in diesem (für Deutschland realistischen) Fall ist die Behandlung mit GammaKnife®-Geräten wesentlich teurer als mit Elektronenbeschleunigern [22] [23].

Die Behandlungsdauer pro Patient ist bei Protonenbeschleunigern im Routinebetrieb vergleichbar mit der bei Elektronenbeschleunigern. Allerdings ist der Patientendurchsatz bei Protonenbeschleunigern etwas niedriger da aufgrund des steileren Dosisgradienten prinzipiell eine präzisere Positionierung des Patienten erfolgen muss; zudem werden an Protonenbeschleunigern mehr Bestrahlungszeiten für Forschung und Qualitätssicherung aufgewendet.

Personalqualifikation

Die notwendigen Qualifikationen für Mitarbeiter in Bezug auf die Strahlenschutz-Fachkunde und die ärztliche Zulassung sind bei einem GammaKnife® wesentlich geringer als bei einer Beschleunigeranlage. So sind nach unseren Befragungen die Ärzte in den deutschen GammaKnife®-Zentren mehrheitlich Neurochirurgen und keine Strahlentherapeuten. Die GammaKnife®-Technik wird in Deutschland vorwiegend von Neurochirurgen als alternative und ergänzende Behandlungsmethode zum invasiven Eingriff und nicht von Strahlentherapeuten als Alternative zur Bestrahlung mit Elektronenbeschleunigern registriert.

Sicherung gegen unbefugten Gebrauch

Die Sicherung gegen den unbefugten Gebrauch innerhalb der therapeutischen Einrichtungen sind bei allen Geräten ähnlich und von vergleichbarem Sicherheitsniveau. Es gibt mehrere Barrieren, die durch Passworteingabe oder Schlüsselgebrauch geschützt sind, bevor eine Bestrahlung gestartet werden kann.

Bei GammaKnife®-Geräten kommt zusätzlich noch das Diebstahlrisiko für die HRQ hinzu. Die Quellen können aus den Geräten zwar nur mit Spezialkenntnissen und –werkzeugen ausgebaut werden. Auch können die mehrere Tonnen schweren Geräte nicht ohne Hilfsmittel wie Schwerlast-Hubwagen oder Krananlagen bewegt werden. Doch durch den regelmäßigen Tausch der HRQ ergibt sich ein nicht zu vernachlässigendes Diebstahlrisiko auf dem Transportweg.

5.3. Prozessüberwachung

Für die Messung von Dicken bzw. Flächengewichten und von Füllständen gibt es im Allgemeinen eine Reihe von unterschiedlichen Messverfahren. Wir betrachten hier nur die alternativen Verfahren, die in Echtzeit zur Prozesssteuerung verwendet werden können. Methoden, bei denen beispielsweise einzelne Proben aus dem Produktionsprozess entnommen und separat analysiert werden, sind mit radiometrischen Messverfahren nicht zu vergleichen, denn damit ist keine aktive Prozesssteuerung, sondern nur eine retrospektive Prozessüberwachung möglich. Die auf Basis von Herstellerrecherchen ermittelten Alternativtechnologien für beide o. g. Anwendungszwecke sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Alternativtechnologien für radiometrische Prozessüberwachung

Füllstandsmessung	Dicken- bzw. Flächengewichtsmessung
Schwimmerpositionsmessung im Bypass	Abschirmmessung mit Röntgenstrahlung
Abstandsmessung mit Mikrowellenrückstreuung (Radar)	Abstandsmessung mit Laserrückstreuung (2-seitig)
Induktive Messung	Induktive Abstandsmessung (2-seitig)
Kapazitive Messung	Kapazitive Abstandsmessung (2-seitig)
Hydrostatische Messung	

In Deutschland sind diese Prozessmesstechniken von vielen Anbietern und Herstellern verfügbar. Beispiele sind:

- IMS Messsysteme GmbH
- Berthold Technologies GmbH & Co. KG
- Endress+Hauser Messtechnik GmbH & Co. KG
- KROHNE Messtechnik GmbH
- VEGA Grieshaber KG
- Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG
- LAP GmbH
- Hengesbach GmbH & Co. KG
- PKP Prozessmesstechnik GmbH

Die folgenden, allgemeinen Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Technologien haben wir auf Basis von Anwenderbefragungen und Recherchen bei den Herstellern ermittelt. Die für den Anwender entscheidenden Bewertungskriterien hängen jedoch von der individuellen Messumgebung ab; Entscheidungen über geeignete Alternativtechnologien sind also stark vom Einzelfall geprägt. Hierfür bieten die Hersteller individuelle Beratungen an, bei denen passend zur Messaufgabe und zum Messgut die Vor- und Nachteile der verschiedenen Messprinzipien abgewogen werden können – allerdings natürlich nur auf Basis der vom jeweiligen Hersteller angebotenen Messsysteme.

Einmalige und laufende Kosten

Zu den Kosten, die bei einem Vergleich der Technologien betrachtet werden müssen, gehören zunächst die Kosten für die Anschaffung und für die Installation des Messsystems. Die Installationskosten können im Einzelfall durch ggf. notwendige Umbaumaßnahmen wie beispielsweise zusätzliche Behälterdurchführungen oder Versorgungsleitungen für Strom oder Kühlwasser stark variieren. Die laufenden Kosten werden durch den Aufwand für Wartungen und Reparaturen geprägt. Bei radiometrischen Messsystemen mit HRQ müssen zusätzlich die Kosten für einen Quellenwechsel berücksichtigt werden; allerdings sind die Halbwertszeiten der üblicherweise verwendeten Nuklide so lang, dass die HRQ eine wesentlich längere Einsatzdauer haben als alle Komponenten aller anderen Messsysteme. Nicht zu vernachlässigen sind die Entsorgungskosten für HRQ, die bei einem Wechsel zu einer der Alternativtechnologien entstehen.

Genauigkeit

Selbstverständlich ist die Genauigkeit des Messverfahrens für die Anwender ein Entscheidungskriterium, um einen möglichen Wechsel von der HRQ-Technik zur Alternativtechnologie zu bewerten.

Bei Füllstandsmessungen kann die erforderliche Genauigkeit abhängig von der Größe des Behälters und der weiteren Prozessschritte stark variieren. Beispielsweise ist bei einem Tank zur Zwischenlagerung von Flüssigkeiten die Kenntnis der ungefähren Füllhöhe oder auch nur die Erfassung eines Min- oder Max-Grenzstandes völlig ausreichend. Wenn Flüssigkeiten in mehreren Behältern jedoch in einem bestimmten Mischungsverhältnis zusammengegeben werden sollen, dann ist die genaue Bestimmung des Füllstands entscheidend für die Qualität des Produkts im nächsten Prozessschritt. Im Vergleich mit den anderen Technologien zur Füllstandsbestimmung liefern Radarmessungen im Allgemeinen die größte Präzision, sofern kein Schaum auf der Oberfläche vorhanden ist.

Dicken- und Flächengewichtsmessungen, die bislang mit HRQ durchgeführt werden, betreffen zumeist Messgüter mit sehr hoher Dichte oder Dicke. Die o. g. alternativen Technologien, die mit Abstandsmessungen arbeiten, können zum Teil wesentlich genauer Dicken bestimmen. Aber Messungen mit

Toleranzen im μm -Bereich sind beispielsweise für Folien- und Papierdickenmessungen, weniger jedoch für Metallbänder erforderlich. Röntgenanlagen, die die Dicke oder das Flächengewicht über die Abschirmung des Messguts ermitteln, erreichen eine größere Genauigkeit als HRQ-Systeme.

Messgutbedingungen

Die Eigenschaften des zu messenden Mediums schränken die möglichen Alternativtechnologien für manche Anwendungen ein.

Röntgenanlagen können beispielsweise nur Dicken- bzw. Flächengewichte bis zu einer gewissen Größe erfassen, die von der Röhrenspannung und -leistung abhängt. Abstandsmessungen sind durch den Abstand zwischen dem Messgut und der Sender-/Empfängereinheit limitiert. Auch induktive und kapazitive Messverfahren unterliegen Beschränkungen in den räumlichen Dimensionen des Messguts bzw. der Geometrie.

Die Rückstreuungseigenschaft des Messgutes ist ebenfalls ein entscheidendes Kriterium. Messungen, die auf der Rückstreuung von Laserstrahlung oder Mikrowellen basieren, funktionieren ausschließlich bei entsprechend reflektierenden Materialien. Eine einfache radargestützte Füllstandsmesseinrichtung kann beispielsweise keine Trennschichten in Flüssigkeiten erkennen und vermessen; es gibt jedoch auch an Seilen oder Stäben geführte Radarsonden, mit denen dies dann möglich ist – allerdings dann nicht mehr kontaktlos.

Auch die Temperatur des Messguts hat Einfluss auf die Auswahl an Alternativtechnologien. Lasersysteme zur Bestimmung von Metallbanddicken funktionieren standardmäßig nur bei Produkten bis max. 200°C . Für Warmbandanlagen mit rotglühendem Messgut ist ein Standardlaser mit einer Wellenlänge von 670 nm (rot) ungeeignet. Zudem kann durch Temperaturunterschiede die Geometrie des Messrahmens stärker als bei anderen Messrahmen beeinflusst werden, so dass die Abstandsmessung fehlerhaft wird. Allerdings gibt es auch Spezialsysteme auf dem Markt, die mit blauem Laserlicht arbeiten und über eine Temperaturkompensation verfügen.

Schließlich sind auch die elektromagnetischen Eigenschaften des Messguts entscheidend. Induktive und kapazitive Messmethoden sind abhängig von der Leitfähigkeit und dessen Konstanz innerhalb des Messguts.

Äußere Bedingungen

Durch die äußeren Bedingungen sind einige der o. g. Messverfahren nicht oder nur eingeschränkt geeignet wie die folgenden Beispiele deutlich machen. Durch sehr hohe oder stark schwankende Umgebungstemperaturen kann die Messgenauigkeit bei einigen Verfahren sinken; isolierende oder gekühlte Messsysteme können in einem begrenzten Maße Abhilfe schaffen. Eine staubhaltige Umgebung beeinträchtigt lasergestützte Messungen; die Hersteller bieten für derartige Fälle jedoch als zusätzliche Option eine Vorrichtung zur Freiblasung des Laserstrahlbereichs an. Fast alle Systeme zur Füllstandsmessung befinden sich innerhalb des zu messenden Behälters, nur bei den radiometrischen und bei einigen induktiven Messsystemen ist sowohl der Sender als auch der Empfänger außerhalb des Behälters. Bei innenliegenden Komponenten sind jedoch Kabeldurchführungen durch die Behälterhülle erforderlich, was bei unter hohem Druck stehenden Behältern eine zusätzliche Herausforderung darstellt. Zudem können innenliegende Komponenten nur mit höherem Aufwand (durch Ausbau oder Behälterbefahrungen) gewartet, geprüft und repariert werden.

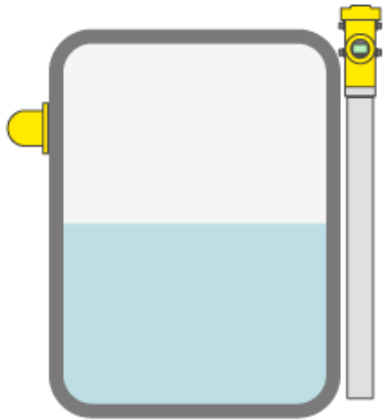


Abbildung 7: Radiometrische Füllstandsmessung

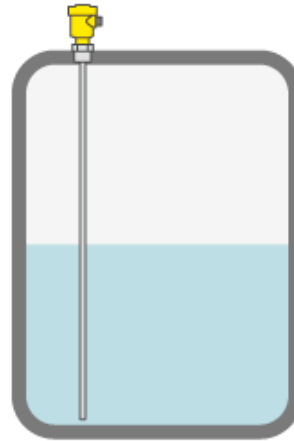


Abbildung 10: Kapazitive Füllstandsmessung

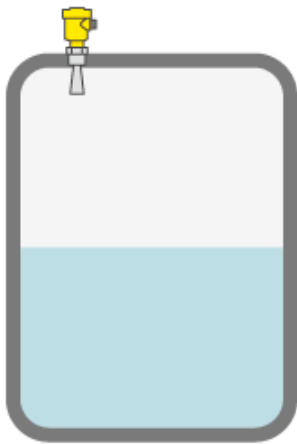


Abbildung 8: Füllstandsmessung mit Radar

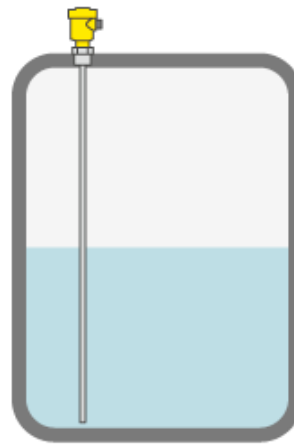


Abbildung 11: Füllstandsmessung mit geführtem Radar



Abbildung 9: Ultraschallfüllstandsmessung

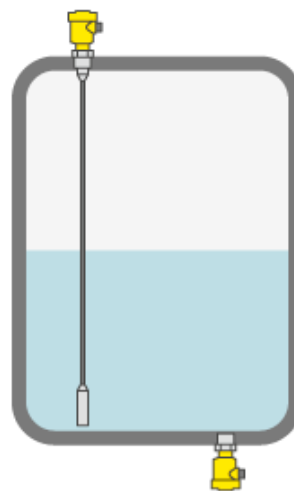


Abbildung 12: Hydrostatische Füllstandsmessung

Möglichkeit der kontaktlosen Messung

Für einige Stoffe ist es erforderlich, den Füllstand oder die Dicke bzw. das Flächengewicht ohne einen Kontakt zwischen Messapparatur und Messgut zu bestimmen. Gründe hierfür sind entweder Anforderungen an die Reinheit des Messgutes (wie beispielsweise in der Lebensmittelindustrie) oder eine zu vermeidende Beschädigung der Messapparatur (wie beispielsweise bei korrosiven oder ätzenden Messgütern). Alle o. g. Dicken- bzw. Flächengewichtsmessungen sind kontaktlos. Zu den kontaktlosen Füllstandsmessverfahren gehören radiometrische und einfache radargestützte Einrichtungen sowie Ultraschallsysteme. In den Abbildungen 8 bis 13 sind schematisch die unterschiedlichen Füllstandsmesssysteme dargestellt (mit freundlicher Genehmigung der VEGA Grieshaber KG).

5.4. Gammaradiographie

Im Bereich der Gammaradiographie werden einige Alternativen zur Verwendung von HRQ bereits seit langem eingesetzt; es gibt zudem aber auch neue alternative Verfahren, die bislang nur vereinzelt verwendet werden. In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist im Vergleich zu den anderen Anwendungsbereichen von HRQ eine relativ hohe Innovationsgeschwindigkeit erkennbar.

Gängige Alternativen ohne Verwendung von HRQ sind Durchstrahlungsprüfungen mit Röntgenanlagen oder Linearbeschleunigern, aktive Thermographie und klassische Ultraschallprüfungen. Neuere, aber schon etablierte Verfahren sind Ultraschallprüfungen mit Phased-Array-Prüfköpfen oder mit der Methode der Beugungslaufzeitmessung (TOFD, Time-Of-Flight-Diffraction). Noch neuer und noch nicht durch europäische oder deutsche Normen standardisiert ist beispielsweise die Methode der elektromagnetischen Ultraschallprüfungen (EMAT, ElectroMagnetic Acoustic Transducer), bei der Ultraschallwellen mittels elektromagnetischer Spulen erzeugt werden, mit dem Vorteil, dass auf Koppelmittel (Gel, Wasser, Öl) verzichtet werden kann.

Aber auch innerhalb des Bereichs der HRQ-Gammaradiographie gibt es verschiedene Alternativen, die unterschiedliches Dispersionspotential besitzen. Wie im Abschnitt 4.4 bereits dargestellt liegt der radioaktive Stoff bei Co-60- und Ir-192-Quellen in metallischer Form, bei manchen Se-75-Quellen jedoch in Pulverform vor.

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Technologien haben wir auf Basis von Anwender- und Herstellerbefragungen ermittelt.

Einmalige und laufende Kosten

Die einmaligen Kosten für die Investition in eine alternative Prüftechnologie hängen stark von der Prüfaufgabe und dem in dem jeweiligen Auftrag festgelegten Prüfumfang ab. Berücksichtigt werden muss hierbei, ob eine Einzelprüfung an einem Bauteil mit einfacher Geometrie, oder eine Serienprüfung an einer großen Anzahl von gleichen Prüfteilen bis hin zur Prüfung von Bauteilen mit komplexer Geometrie durchgeführt werden soll. Beispielsweise liegen die Investitionskosten für eine Röntgenanlage zur Durchstrahlung von komplexeren Bauteilen um den Faktor 5 bis 10 höher als der Preis für ein einfaches Ultraschallprüfgerät zur manuellen Prüfung von Bauteilen einfacher Geometrie.

Weiterhin sind die laufenden Kosten wie jährliche Kalibrierung und Instandhaltung, notwendiges Verbrauchsmaterial und fixe Kosten, die unabhängig von der Nutzungsdauer des Prüfgerätes anfallen (z. B. baulicher Strahlenschutz und Diebstahlschutz), zu berücksichtigen. Die Kosten für die Qualifizierung und Zertifizierung des Prüfpersonals spielen ebenfalls eine nicht unerhebliche Rolle.

Prüfgeschwindigkeit

Bei der Durchführung von zerstörungsfreien Prüfungen steht häufig der Kostenaspekt bei der Auswahl der Prüftechnik im Vordergrund. In direktem Zusammenhang hierzu ist die von dem jeweiligen Prüfverfahren auf den Anwendungsfall bezogene, erreichbare Prüfgeschwindigkeit zu sehen. Unterschiede in der Prüfgeschwindigkeit ergeben sich bei den verschiedenen Prüfverfahren in der Größe des gleichzeitig betrachteten Prüfbereichs und der Möglichkeit schnell von einem Prüfbereich zum nächsten zu wechseln. Abzuwägen ist hier zum Beispiel der hohe apparative Aufwand einer mechanisierten Phased Array Ultraschall Prüfung mit einer vergleichsweise einfach einzurichtenden Durchstrahlungsprüfung mit einer Röntgenanlage.

Umgebungsbedingungen

Ein wesentlicher Aspekt bei der Auswahl einer alternativen Prüftechnik sind die Umgebungsbedingungen unter denen eine zerstörungsfreie Prüfung durchgeführt werden soll. Angefangen von einer Prüfung einer Schweißerprobe unter Laborbedingungen bis hin zu einer Prüfung von Pipeline-Rohrverbindungen oder der Prüfung von Schweißnähten eines eingerüsteten Druckbehälters ergeben sich unterschiedliche Randbedingungen, die bei der Auswahl der Prüftechnik berücksichtigt werden müssen. Hierbei spielen Aspekte wie die Handhabung, das Gewicht sowie die Randbedingungen beim Transport der Prüftechnik eine wesentliche Rolle. Die Sicherheit des Prüfpersonals, zu der auch der Strahlenschutz gehört, muss dabei in jedem Fall durch geeignete Maßnahmen und persönliche Schutzausrüstung gewährleistet sein.

Abhängigkeit der Prüfaussage vom Prüfobjekt

Die verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren beruhen auf unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzipien. Daraus resultieren von der Prüftechnik abhängige Prüfvoraussetzungen und Prüfparameter. In Abhängigkeit von Einflussgrößen wie der Geometrie, den Abmessungen und dem Werkstoff der Prüfteile sind Prüftechniken mehr oder weniger gut geeignet, um mit ihnen eine gesicherte Prüfaussage zu erzielen. Auch die Prüfgenauigkeit, d. h. die Größe des nachweisbaren Fehlers im zu prüfenden Bauteil ist in diesem Zusammenhang zu sehen und stark von den oben genannten Parametern abhängig. Von besonderem Interesse ist hier die Vergleichbarkeit der mit alternativen Prüftechniken erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen der Durchstrahlungsprüfung mit HRQ.

Beispielsweise wird eine Pore in einer Schweißnaht mittels Durchstrahlungsprüfung mit einer Röntgenanlage etwas besser dargestellt als bei einer Durchstrahlungsprüfung mit HRQ, während sie mit der manuellen Ultraschallprüfung nahezu unauffindbar ist. Ein Lunker³⁸ in einem Gussblock mit einer Wandstärke von 500 mm ist dagegen mit einer Röntgenanlage aufgrund der großen Wandstärke nicht mehr nachzuweisen. Auch die Durchstrahlung mittels HRQ stößt hier an ihre Grenzen wohingegen der Lunker durch eine Ultraschallprüfung in der Regel nachgewiesen werden kann.

Verfügbarkeit von Durchführungsnormen

Für die Akzeptanz einer zerstörungsfreien Prüfung durch den Auftraggeber ist die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Prüfung von großer Bedeutung. Erreicht wird eine hohe Akzeptanz bzw. ein hohes Vertrauen in eine zerstörungsfreie Prüfung durch das Einhalten von Durchführungsnormen und ggf. das Erstellen von Prüfanweisungen nach denen die Prüfung geregelt durchgeführt werden kann. Aktuell ist für die Ultraschallprüfung nach dem EMAT-Verfahren für viele Anwendungsbereiche noch keine Durchführungsnorm verfügbar. Sind für eine Prüftechnik bzw. Prüfaufgabe entsprechende Normen nicht vorhanden, müssen evtl. an den Anwendungsfall angepasste Qualifizierungen der

³⁸ Lunker: Ein Hohlraum, der bei der Erstarrung gegossener Teile entstehen kann. Ursache hierfür ist die Schwindung des Werkstoffvolumens aufgrund der Abkühlung und Erstarrung der Schmelze.

Prüftechnik durchgeführt und dokumentiert werden. Diese Qualifizierungen sind in der Regel zeit- und kostenintensiv und schränken dadurch die Einsetzbarkeit einer Prüftechnik ein.

5.5. Brachytherapie

Für die High-Dose-Rate-Brachytherapie (HDR-Brachytherapie) gibt es mehrere mögliche Alternativtechnologien, die ohne die Verwendung von HRQ auskommen. Diese sind in der Tabelle 5 dargestellt. Diese Technologien können jedoch meist nur einen Teilbereich der HDR-Brachytherapie medizinisch gleichwertig ersetzen (siehe Spalte „Anwendungsgebiet“), wobei die medizinische Gleichwertigkeit der ständig fortschreitenden medizinischen Forschung unterliegt. Die grundsätzliche Entscheidung eines Klinikums oder einer Praxis für oder gegen die HDR-Brachytherapie ist somit sehr komplex und muss neben der medizinischen Effektivität auch die jeweilige Abrechnungs- bzw. Vertragsstruktur mit den Krankenkassen berücksichtigen. Zudem hängt die Entscheidung in der Praxis auch davon ab, welche Alternativtechnologien vor Ort bereits verfügbar und etabliert sind.

Tabelle 5: Alternativtechnologien zur HDR-Brachytherapie

Technologie	Anwendungsgebiet	Quellen
Low-Dose-Rate-Brachytherapie (LDR)	Prostata, Auge, Gehirn	I-125 Seeds oder Ru-106 Applikatoren
Intra-Operative Röntgentherapie (IORT)	Oberflächliche Gewebe in der offenen OP-Wunde	Röntgenanlage, ca. 50 kV
e-Brachytherapie	Größere Kavitäten, oberflächliche Gewebe	Röntgenanlage, 50 bis 100 kV
Intra-Operative Elektronenstrahltherapie	Oberflächliche Gewebe in der offenen OP-Wunde	Elektronenbeschleuniger, 50 bis 100 keV
Perkutane Photonenteletherapie	Ganzkörper	Elektronenbeschleuniger, 6 bis 15 MeV (s. Abschnitt 5.2)
Perkutane Röntgenteletherapie	Haut, Extremitäten	Röntgenanlage, max. 300 kV
Perkutane Ionenstrahlteletherapie	Ganzkörper (Zielvolumen in der Nähe von Risikoorganen)	Ionenbeschleuniger (s. Abschnitt 5.2)

Aber auch innerhalb des Bereichs der HDR-Brachytherapie gibt es verschiedene Alternativen, die sich hinsichtlich des Risikos für eine missbräuchliche Verwendung voneinander unterscheiden. Wie im Abschnitt 4.5 bereits dargestellt müssen Ir-192-Quellen durchschnittlich nach drei bis vier Monaten ersetzt werden, bei Co-60-Quellen ist dies erst nach mehreren Jahren notwendig. In Deutschland sind ca. 90 % der Afterloading-Geräte mit Ir-192 und nur ca. 10 % mit Co-60 ausgestattet; durch eine bundesweite Umstellung von Ir-192 auf Co-60 könnte somit eine Vielzahl an Transporten mit HRQ eingespart und damit das Diebstahlrisiko insgesamt reduziert werden.

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Technologien haben wir auf Basis einer Literaturrecherche sowie unter Berücksichtigung von Anwender- und Herstellerbefragungen ermittelt.

Medizinische Effektivität

Die medizinische Effektivität in der Strahlentherapie hängt von der Fähigkeit ab, eine möglichst hohe Dosis im Zielvolumen zu applizieren bei gleichzeitig möglichst niedriger Dosis in dem umgebenden Normalgewebe. Die verschiedenen Formen der Teletherapie haben dabei den Vorteil, dass der Patient perkutan, ohne chirurgische Eingriffe und daher mit einer Vielzahl von Fraktionen über einen längeren Zeitraum behandelt werden kann. Die Brachytherapie-Techniken haben dagegen den Vorteil, dass die

Strahlenquelle sehr nah am Zielvolumen platziert und dadurch das Normalgewebe besser geschont werden kann. Die Wahl, ob Brachy- oder Teletherapie eingesetzt wird, hängt daher im medizinischen Einzelfall von vielen Faktoren ab, beispielsweise vom Abstand des Zielvolumens zu den besonders strahlenempfindlichen und daher zu schonenden Risikoorganen. Vielfach ergänzen sich Tele- und Brachytherapie auch und werden bei einem Patienten nacheinander angewendet.

Auch wenn es im Bereich der Teletherapie in den letzten Jahrzehnten deutliche Fortschritte in der medizinischen Effektivität gegeben hat³⁹, so sind bei vielen Indikationen die Brachytherapie-Techniken nach wie vor der medizinische Standard [24].

Innerhalb der medizinischen Forschung zur Brachytherapie gibt es mit der HDR-Brachytherapie, der LDR-Brachytherapie und den intraoperativen Therapieformen mehrere konkurrierende Technologien. Zu diesen gibt es eine Vielzahl an vergleichenden Studien zur physikalischen Dosiskonformität und zur medizinischen Effektivität mit jeweils nicht übereinstimmenden Ergebnissen.

Die HDR-Brachytherapie hat jedoch – unabhängig vom Maßstab der medizinischen Effektivität – den Vorteil, dass sie vorhandene Körperöffnungen nutzen kann; bei der LDR-Brachytherapie mit Seeds und bei den intraoperativen Techniken ist dagegen immer ein chirurgischer Eingriff notwendig. Röntgenanlagen galten bis vor einigen Jahren als prinzipiell zu groß, um sie in der Brachytherapie ohne chirurgischen Eingriff einsetzen zu können⁴⁰. Doch der technische Fortschritt bei der Miniaturisierung von Röntgenanlagen hat dazu geführt, dass in einigen Veröffentlichungen schon der Anbruch einer neuen Ära der Brachytherapie ohne den Einsatz von Radionukliden gesehen wird⁴¹ [25].

Der Forschungsbedarf zur Untersuchung der medizinischen Effektivität verschiedener Brachytherapie-Techniken ist nach wie vor sehr groß.

Einmalige und laufende Kosten

Zu den einmaligen Kosten zählt neben dem Anschaffungspreis für das Gerät auch der bauliche Strahlenschutz des Bestrahlungsraums. Die Ionen- und Elektronenbeschleuniger für die perkutane Teletherapie und der zugehörige notwendige bauliche Strahlenschutz sind um ein Vielfaches teurer als alle anderen o. g. Systeme. Allerdings haben diese Beschleunigeranlagen ein wesentlich breiteres Anwendungsspektrum.

Der Anschaffungspreis für die übrigen Geräte liegt in etwa auf einem einheitlichen Preisniveau. Der bauliche Strahlenschutz ist jedoch für Co-60-Anlagen aufgrund der höheren Photonenenergie aufwendiger als für Ir-192-Anlagen. Die LDR-Brachytherapie und die Röntgenanlagen sind noch einmal günstiger in Bezug auf den baulichen Strahlenschutz.

Bei den laufenden Kosten liegen die Ionen- und Elektronenbeschleuniger wieder deutlich über allen anderen Systemen, sind jedoch bei deutlich mehr Indikationen einsetzbar.

In der LDR-Brachytherapie sind die laufenden Kosten im Gegensatz zu den anderen Techniken stark abhängig von der Patientenzahl, weil dort – einschließlich der Seeds – viele Einwegprodukte benötigt

³⁹ insbesondere durch: Intensity Modulated RadioTherapy (IMRT), Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)

⁴⁰ So schrieben George Moore und Miles Pomper in ihrer „Roadmap for replacing high-risk radioactive sources and materials“ im Juli 2015: „X-ray units are simply too large for internal use and there is no current adequate alternative to the use of the radionuclides in brachytherapy treatment.“

⁴¹ Prabhakar Ramachandran schreibt im „World Journal of Radiology“ im April 2017: „One of the limiting factors that impede the use of electronic brachytherapy for interstitial application is the source dimension. However, it is highly anticipated that the design of miniaturized X-ray tube closer to the dimension of an Ir-192 wire is not too far away, and the new era of electronic brachytherapy has just begun.“

werden. Bei Afterloading- und Röntgenanlagen kommen jedoch regelmäßige Wartungskosten hinzu. Innerhalb der HDR-Brachytherapie sind die laufenden Kosten bei Co-60-Geräten aufgrund der wesentlich geringeren Quellenwechselfrequenz niedriger als bei Ir-192-Geräten.

Im Allgemeinen ist bei Kostenbetrachtungen im Gesundheitswesen zu berücksichtigen, dass Ausgaben für den Bestrahlungsraum, Ausgaben für die Geräteanschaffung und laufende Kosten zum Teil von jeweils unterschiedlichen Trägern finanziert werden. Bei Anwendern, die beispielsweise für die laufenden Kosten, nicht jedoch für die Kosten des Bestrahlungsraums aufkommen müssen, sind die Vorteile eines einfachen baulichen Strahlenschutzes nicht spürbar.

Strahlenschutz des Personals

Die durchschnittliche Strahlenexposition des Personals ist in der Brachytherapie wie in der Teletherapie vor allem im Vergleich zur Nuklearmedizin eher gering. Dennoch gibt es einige prinzipielle Unterschiede im jeweiligen Potential der Strahlenexposition.

In der HDR-Brachytherapie wird die Strahlenexposition für das Personal im Wesentlichen durch den Aufenthalt neben dem Afterloading-Gerät während der Patientenpositionierung bestimmt. Während der Behandlung hält sich das Personal außerhalb des abgeschirmten Bestrahlungsraums auf.

Bei der LDR-Brachytherapie muss das Personal direkt mit den radioaktiven Quellen umgehen, um sie händisch in die gewünschte Bestrahlungsposition zu bringen. Diese Quellen sind aufgrund der nur kurzreichweitigen Strahlung jedoch leicht mit entsprechenden Hilfsmitteln abzuschirmen. Die Strahlenexposition des pflegenden Personals bei Patienten mit implantierten Seeds ist aus dem gleichen Grund sehr gering.

Intraoperative Techniken haben ein höheres Expositionsrisiko für das Personal. Zwar kann die Bestrahlung sehr exakt lokal begrenzt und die Streustrahlung durch einfache Hilfsmittel ausreichend abgeschirmt werden, doch Handhabungsfehler mit einer unnötigen Exposition des Personals erscheinen in einer chirurgischen Umgebung nicht ausgeschlossen zu sein.

Bei der Teletherapie ist dagegen die Strahlenexposition des Personals äußerst gering. Durch das Interlocksystem der Anlagen kann die Bestrahlung nur dann gestartet werden, wenn sich das Personal außerhalb des vollständig abgeschirmten Bestrahlungsraums befindet.

5.6. Kleinkammerbestrahlung

Bei Anlagen für Kleinkammerbestrahlungen ist es aufgrund des unterschiedlichen Verwendungszwecks sinnvoll, zwischen der Bestrahlung von Blutprodukten und der Bestrahlung von Forschungsgegenständen (Kleintiere, Zellkulturen, organische Materialien) zu unterscheiden.

5.6.1. Bestrahlung von Blutprodukten

Für die Sterilisation von Blutprodukten gibt es in Deutschland zwei verschiedene zugelassene Verfahren: die Bestrahlung mit ionisierender Strahlung und die Bestrahlung mit UVA-Licht nach Zugabe einer Amotosalen-HCl-Lösung⁴². In der Tabelle 6 sind die verschiedenen Blutprodukte, ihr Verbrauch sowie die zugelassenen Sterilisationsmethoden dargestellt. Anhand dieser Tabelle ist erkennbar, dass UV-Bestrahlungen nur einen kleinen Teil der notwendigen Sterilisationen abdecken können. Es gibt zwar Forschungen auf dem Gebiet der UV-Bestrahlung von Erythrozyten-Konzentraten, aber zurzeit ist diese Methode nach unserer Literaturrecherche noch weit von der klinischen Praxis entfernt.

⁴² Amotosalen ist eine fotoaktive Verbindung, die unter UVA-Bestrahlung eine Quervernetzung innerhalb des DNA-Doppelstrangs herstellt, so dass keine Replikation dieser DNA mehr möglich ist.

Alternative Technologien müssen also innerhalb des Gebiets der ionisierenden Strahlung untersucht werden.

Tabelle 6: Verbrauch und Sterilisationsmethoden für Blutprodukte aus Fremdblut (Deutschland)

Blutprodukt	Verbrauch (Transfusionseinheiten je 100.000 Einwohner) ⁴³	Sterilisationsmethode gemäß der Richtlinie Hämotherapie [26]
Erythrozyten-Konzentrat	4113,4	Ionisierende Strahlung
Thrombozyten-Konzentrat	609,5	Ionisierende Strahlung oder UV-Bestrahlung
Blutplasma	823,2	UV-Bestrahlung

Die ionisierende Strahlung kann außer durch Cs-137-HRQ auch durch Röntgenanlagen oder durch Elektronenbeschleuniger erfolgen. Entscheidend für diesen Verwendungszweck ist eine Standarddosis von 30 Gy, wobei an keiner Stelle des Produkts die Dosis von 25 Gy unterschritten werden darf [26].

Röntgenanlagen für Blutbestrahlungen sind nach einer Recherche in unserer Kundendatenbank bislang in Deutschland noch nicht im Einsatz. In den USA, wo es ein von der NNSA⁴⁴ aufgesetztes Förderprogramm zum Wechsel von Cs-137-Bestrahlungsanlagen zu Röntgenanlagen gibt (CIRP⁴⁵), sind Röntgenanlagen für Blutbestrahlungen von drei Herstellern von der FDA⁴⁶ zugelassen: Best Theratronics⁴⁷, Hitachi⁴⁸ und RadSource⁴⁹ (Stand: 2018). Die Anlagen von Best Theratronics und RadSource haben gemäß den Produktbroschüren zudem eine CE-Kennzeichnung.

Die Möglichkeit, Blutprodukte mit einem Elektronenbeschleuniger zu bestrahlen, wird in Deutschland nur sehr vereinzelt in wenigen Kliniken durchgeführt. In diesen Fällen werden die Elektronenbeschleuniger der Strahlentherapie für die Sterilisationsbestrahlungen im Rahmen eines Ausfallkonzepts verwendet.

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen der Verwendung von Cs-137-HRQ, Röntgenanlagen und Beschleunigern haben wir auf Basis einer Literaturrecherche und insbesondere unter Berücksichtigung einer Cost-Benefit-Analyse im Auftrag der NNSA [27] und einer Untersuchung des James Martin Centers for Nonproliferation Studies [28] ermittelt.

Einmalige und laufende Kosten

Beim Vergleich der Anschaffungskosten von Cs-137- und Röntgenanlagen muss die unterschiedliche Lebensdauer dieser Anlagen mitberücksichtigt werden. Während eine Cs-137-Anlage bis zu 30 Jahre im Einsatz sein kann, liegt die mittlere Lebensdauer einer Röntgenanlage bei 10 bis 15 Jahren [27]. Allerdings müssen bei Cs-137-Anlagen die Kosten für die spätere Entsorgung der HRQ mit betrachtet werden.

Als einmalige Ausgaben müssen neben dem Anschaffungspreis und dem Entsorgungspreis auch die Kosten für den Bestrahlungsraum berücksichtigt werden. Der bauliche Strahlenschutz sollte bei modernen, fast vollständig selbstabgeschirmten Anlagen kein wesentlicher Faktor sein, zumal bei einer

⁴³ Gesundheitsberichterstattung des Bundes – gemeinsam von RKI und DESTATIS: <http://www.gbe-bund.de/>

⁴⁴ NNSA: National Nuclear Security Administration (Forschungseinrichtung des US-Energieministeriums)

⁴⁵ CIRP: Cesium Irradiator Replacement Project

⁴⁶ FDA: Food and Drug Administration, Lebensmittelüberwachungs- und Arzneimittelbehörde der USA

⁴⁷ <http://www.theratronics.ca/> (Produktname: Raycell®)

⁴⁸ <http://www.hitachi.com/> (Produktname: Sangray)

⁴⁹ <https://www.radsources.com/> (Produktname: RS 3400 X-ray Blood Irradiator)

Ersatzanschaffung der bisherige Bestrahlungsraum in den meisten Fällen weiter genutzt werden kann. Im Falle einer Cs-137-Anlage ist mit zusätzlichen Kosten für die Sicherstellung eines ausreichenden Diebstahlschutzes gemäß den aktuellen Normen und Richtlinien zu rechnen. Bei einer Röntgenanlage ist hingegen je nach Gerätetyp eine externe Kühlwasserversorgung im Bestrahlungsraum notwendig.

Für einen Vergleich der laufenden Kosten sind die folgenden Faktoren relevant: Strom- und ggf. Wasserversorgung, Wartungen, Reparaturen und Kalibrierungen. Aufgrund des einfacheren technischen Prinzips ist eine Cs-137-Anlage in diesen Punkten vorteilhaft gegenüber einer Röntgenanlage [28].

Eine Abschätzung der einmaligen und laufenden Kosten für die Variante, Blutprodukte mit einer Beschleunigeranlage in der Strahlentherapie zu bestrahlen, ist kaum möglich. Denn diese Beschleunigeranlagen sind üblicherweise so gut ausgelastet, dass die Bestrahlung von Blutprodukten nur in Einzelfällen oder als temporärer Ersatz durchgeführt werden. Da der Anschaffungspreis für eine medizinische Beschleunigeranlage in der Strahlentherapie um mindestens den Faktor 10 höher liegt als für eine Blutbestrahlungsanlage, ist eine Beschleunigeranlage, die ausschließlich zur Bestrahlung von Blutprodukten verwendet wird, nicht wirtschaftlich.

Dosishomogenität

Wie oben bereits beschrieben liegt die übliche Dosis bei 30 Gy und die minimale Dosis bei 25 Gy. Dosiswerte oberhalb von 50 Gy sollten vermieden werden, um unerwünschte Schädigungen der Blutprodukte zu verhindern [28]. Eine Dosishomogenität in diesem Bereich ist also für die Bestrahlung von Blutprodukten erforderlich. Cs-137-Anlagen, Röntgen- und Beschleunigeranlagen können diese Homogenität sicher gewährleisten, weil im Vergleich zu Großkammerbestrahlungsanlagen die zu bestrahlende Materialtiefe nur wenige Zentimeter beträgt. Regelmäßige Kontroll- und Kalibriermessungen sind bei allen Gerätetypen üblich und vorgeschrieben [26].

Bestrahlungsdauer

Die Bestrahlungsdauer, um die geforderte Dosis zu erreichen, sollte für eine gute Geräteauslastung möglichst kurz sein. Bei den Cs-137-Anlagen liegt die Bestrahlungszeit für 30 Gy bei 10 bis 20 Minuten (abhängig vom Alter der Quelle). Bei Röntgenanlagen ist diese Zeit mit 4 bis 5 Minuten wesentlich kürzer. Bei einer Beschleunigeranlage in der Strahlentherapie kann von einer Bestrahlungszeit von 5 bis 10 Minuten ausgegangen werden.

Nach unseren Erfahrungen werden in Deutschland bei den meisten Blutspendediensten jedoch nur so wenige Bestrahlungen durchgeführt, dass eine Bestrahlungszeit von 10 bis 20 Minuten für den Workflow absolut ausreichend ist.

Ausfallzeiten

Der kurzfristige Ausfall eines Blutbestrahlungsgeräts greift aufgrund des normalerweise relativ stetigen Ablaufs empfindlich in den Workflow eines Blutspendedienstes ein. Cs-137-Anlagen haben aufgrund ihres vergleichsweise einfachen technischen Prinzips eine deutlich höhere Verfügbarkeit als Röntgen- und Beschleunigeranlagen, die häufiger eine Reparatur benötigen [28].

5.6.2. Bestrahlung von Forschungsgegenständen

Für die Bestrahlung von Kleintieren, Zellkulturen und anderen organischen Materialien zu Forschungszwecken werden üblicherweise die gleichen Geräte wie für die Bestrahlung von Blutkomponenten verwendet. Untersucht werden damit die Wirkungen ionisierender Strahlung auf Zellen und Organismen. Alternative Technologien müssen demnach ebenfalls ionisierende Strahlung emittieren. Als Alternative sind die im Abschnitt 5.6.1 schon genannten Röntgenanlagen denkbar.

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich dieser Technologien ähneln denen für den Bereich der Blutbestrahlung.

Einmalige und laufende Kosten

Wie oben bereits beschrieben muss die unterschiedliche Lebensdauer von Cs-137-Anlagen (bis zu 30 Jahre) und Röntgenanlagen (bis zu 15 Jahre) beim Vergleich der Anschaffungskosten berücksichtigt werden. Bei Cs-137-Anlagen müssen zudem die Kosten für die spätere Entsorgung der HRQ mit eingepreist werden.

Die einmaligen Kosten für den Bestrahlungsraum werden bei Cs-137-Anlagen hauptsächlich durch die Sicherstellung eines ausreichenden Diebstahlschutzes bestimmt. Bei Röntgenanlagen sind die Kosten für die ggf. erforderliche externe Kühlwasserversorgung zu berücksichtigen.

Beim Vergleich der laufenden Betriebskosten sind die Cs-137-Anlagen aufgrund des einfacheren technischen Prinzips im Vergleich mit Röntgenanlagen im Vorteil.

Dosishomogenität

Eine ausreichende Dosishomogenität ist auch im Bereich der Forschung erforderlich, um Dosis-Wirkungsbeziehungen exakt zu untersuchen. Die im Abschnitt 5.6.1 genannten Röntgenanlagen erreichen gemäß den Produktbeschreibungen der Hersteller eine Homogenität, die nicht schlechter ist als die von Cs-137-Anlagen.

Bestrahlungsdauer

Die Bestrahlungsdauer bei gegebener Dosis liegt wie oben dargestellt bei Röntgenanlagen niedriger als bei Cs-137-Anlagen. Nach unseren Anwenderbefragungen sind die Geräte für Forschungszwecke allerdings nicht so stark ausgelastet, dass eine etwas kürzere Bestrahlungsdauer tatsächlich einen entscheidenden Vorteil in der Praxis hätte. Einzig bei Bestrahlungen von sedierten Kleintieren kann eine kurze Bestrahlungszeit von Vorteil sein, um die Dosierung des Sedativums zu minimieren.

Die im Vergleich zu Blutbestrahlungsanlagen geringe Auslastung und die vergleichsweise niedrige Dringlichkeit im täglichen Workflow der Bestrahlungen sind auch die Gründe dafür, dass die Ausfallzeiten hier nicht als Bewertungskriterium genannt sind.

Vergleichbarkeit von Studienergebnissen aus früheren Forschungen

Wissenschaftler sind darauf angewiesen, Experimente zu verifizieren und Studienergebnisse miteinander zu vergleichen. Wenn Cs-137-Anlagen durch Röntgenanlagen ersetzt werden sollen, dann ist die Vergleichbarkeit bzw. eine mögliche Umrechnung der jeweiligen Dosiswirkungen entscheidend für die Forschung. Es gibt zwar Untersuchungen wie die Dosis bei einem Anlagenwechsel angepasst werden muss, um gleiche Wirkungen zu erzeugen. Doch bei Experimenten mit Mäusen wurde beispielsweise gezeigt, dass bestimmte Immunzellen sich nach einer Cs-137-Bestrahlung schneller erholen als nach einer Röntgenbestrahlung; bei anderen Immunzellen wurde ein gegenteiliger Zusammenhang festgestellt [29]. Derartige Ergebnisse können die Zuversicht der Wissenschaftler im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse nach einem Anlagenwechsel erschüttern [30].

5.7. Bohrlochuntersuchungen

Als alternative Neutronenquellen für die Untersuchungen von Bohrlöchern oder Kavernen sind kompakte Linearbeschleuniger als **Neutronengeneratoren** verfügbar und werden von mehreren Anwendern zusätzlich zu den HRQ bereits eingesetzt. In diesen Generatoren werden Deuteriumionen auf einigen 10 cm beschleunigt und auf ein deuterium- oder tritiumhaltiges Target geschossen. Dabei entstehen durch Fusionsreaktionen Heliumisotope und die für die Rückstreuemessungen verwendeten Neutronen⁵⁰. Da bei der üblichen Beschleunigungsenergie im Bereich 100 – 500 keV der Wirkungsquerschnitt für Deuterium-Tritium-Reaktionen wesentlich höher ist als für Deuterium-Deuterium-Reaktionen⁵¹ werden in Deutschland ausschließlich Generatoren mit tritiumhaltigen Targets verwendet. Das Targetmaterial wird dabei kontinuierlich verbraucht.

In Deutschland sind Neutronengeneratoren (auf Basis von Deuterium-Tritium-Reaktionen) mehrerer Hersteller im Einsatz:

- Schlumberger, New Jersey, USA
- Baker Hughes Oilfield, Texas, USA
- Weatherford International, Texas, USA
- Thermo MF Physics, Colorado, USA
- Allrussisches Forschungsinstitut für Automation, Moskau, Russland

Neben der Rückstreuung von Neutronen gibt es noch eine weitere Möglichkeit den Wasserstoffgehalt des umliegenden Gesteins orts aufgelöst zu ermitteln. Mittels des **Prinzips der Kernspinresonanz** (nuclear magnetic resonance, NMR) läßt sich direkt die Konzentration von wasserstoffhaltigen Porenflüssigkeiten und darüber wichtige Kenngrößen wie die Porengröße oder die Gesteinsporosität bestimmen.

Die Gesteinsporosität wiederum läßt sich außer über die Neutronenrückstreuung und über die Kernspinresonanz auch noch über **Ultraschallmessungen** bestimmen. Dabei werden sowohl die Laufzeit als auch die Dämpfung der Schallwellen zwischen dem Sender und dem Empfänger gemessen und daraus Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Gesteins gezogen.

Die ebenfalls üblichen **elektromagnetischen Messmethoden** (EM), mit denen über die Bestimmung von Größen wie beispielsweise der Dielektrizitätskonstanten oder der magnetischen Permeabilität Informationen über das Gestein gesammelt werden, sind weniger als Alternative, sondern eher als Ergänzung zu den oben beschriebenen Methoden zu sehen. Beispielsweise wird zunächst mit elektromagnetischen Messmethoden ermittelt, ob es sich um eine wasser- oder ölführende Gesteinsschicht handelt; anschließend wird auf Basis dieser Erkenntnisse dann durch Messung der Wasserstoffkonzentration die Gesteinsporosität ermittelt.

Allgemein ist festzuhalten, dass bei der Bestimmung einer bestimmten geophysikalischen Eigenschaft oftmals mehrere Messmethoden verwendet werden, und es ist eine Mischung aus Wissenschaft und Erfahrung, die Rohdaten richtig zu interpretieren und aus einer Kombination von unterschiedlichen Messparametern realitätstreue Rückschlüsse auf das Gestein zu gewinnen.

⁵⁰ monoenergetische Neutronen mit 2,5 MeV (Deuteriumtarget) bzw. 14,1 MeV (Tritiumtarget)

⁵¹ Wirkungsquerschnitte: IAEA Nuclear Reaction Data Centres, Experimental Nuclear Reaction Data, <https://www-nds.iaea.org/exfor/>

Nahezu alle großen Firmen auf dem Gebiet der Erdöl- bzw. Erdgasgewinnung bieten alle oben genannten Techniken und individuelle Software-Lösungen für die Interpretation der Rohdaten an:

- Schlumberger, New Jersey, USA
- Halliburton, Texas, USA
- Baker Hughes Oilfield, Texas, USA
- Weatherford International, Texas, USA

Die folgenden Bewertungskriterien für einen Vergleich zwischen der Verwendung von Am-241/Be-Quellen, Neutronengeneratoren, NMR-Systemen und Ultraschallsystemen haben wir auf Basis einer Studie des US-amerikanischen Energieministeriums aus dem Jahr 2010 [31] ergänzt durch Anwender- und Herstellerbefragungen ermittelt.

Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten für eine Am-241/Be-Quelle liegen im Bereich von einigen 10.000 € und damit ähnlich hoch wie die Anschaffungskosten eines Neutronengenerators. Allerdings ist die Neutronenquelle nur ein Teil des gesamten Messwerkzeugs (Tools), zu dem auch noch beispielsweise die Spannungsversorgung, die Steuerung und die Detektoren gehören. Im Vergleich mit einem Am-241/Be-Tool liegt der Anschaffungspreis für ein Neutronengenerator-Tool bei ca. dem 1,5-fachen Wert. Der Preis für ein Neutronengenerator-Tool der neuesten Generation liegt im oberen sechststelligen Bereich (US-Dollar).

Haltbarkeit / maximale Verwendungsdauer

Wie oben bereits beschrieben verbraucht sich das Targetmaterial von Neutronengeneratoren beim Betrieb kontinuierlich, so dass übliche Generatoren eine maximale Betriebsdauer von ca. 1000 Stunden haben. Auch die Neutronen-freien Messwerkzeuge sind aufgrund der technischen Komplexität bei der Signalerzeugung in ihrer Verwendungsdauer ähnlich stark begrenzt. Die Am-241/Be-Quellen können im Gegensatz dazu aufgrund der Halbwertszeit des Am-241 wesentlich länger eingesetzt werden, was sich auch dadurch zeigt, dass einige der aktuell verwendeten Quellen schon vor Jahrzehnten hergestellt wurden und immer noch im Einsatz sind.

Ausfallsicherheit während der Bohrlochuntersuchung

Die Messsysteme in den Bohrwerkzeugen müssen bei hohen Temperaturen, bei großen Drücken und unter starken mechanischen Belastungen (Vibrationen, Stöße) kontinuierlich und zuverlässig arbeiten. Eine Unterbrechung oder Neuaufnahme des Messbetriebs ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Die Ausfallsicherheit nimmt daher für die Anwender einen hohen Stellenwert ein. Dabei sind die Am-241/Be-Quellen weniger störanfälliger als die anderen Technologien; dieser Unterschied ist in den letzten zehn Jahren jedoch wesentlich kleiner geworden.

Kompaktheit bzw. Kombinationsmöglichkeit mit anderen Messsystemen im gleichen Bohrwerkzeug

Bei Bohrlochuntersuchungen werden häufig Tools eingesetzt, die mit mehreren Messsystemen bestückt sind, um verschiedene Parameter gleichzeitig messen zu können. Dabei ist eine kompakte Bauform des einzelnen Messsystems innerhalb des gesamten Tools vorteilhaft. Zudem ist eine Neutronenquelle, die keine Hochspannungsversorgung benötigt, leichter in Tools einzubauen, da die Kabel für die Hochspannungsversorgung innerhalb des Tools um die anderen Messsysteme herumgeführt werden müssen.

Die Am-241/Be-Quellen sind sowohl hinsichtlich der Größe als auch hinsichtlich der Hochspannungsversorgung gegenüber den anderen Technologien im Vorteil.

Vergleichbarkeit mit Messergebnissen aus früheren Bohrlochuntersuchungen

Frühere Bohrlochuntersuchungen liefern häufig die Grundlage für wiederkehrende Vergleichsmessungen. Die Messergebnisse aus den Untersuchungen mit Am-241/Be-Quellen sind dabei aufgrund des unterschiedlichen Neutronenenergie-Spektrums nicht direkt und einfach vergleichbar mit den Ergebnissen, die mit Neutronengeneratoren ermittelt werden. Da in den vergangenen Jahrzehnten mehrheitlich mit Am-241/Be-Quellen gearbeitet wurde, sind heutige Vergleichsmessungen unter der Verwendung von Am-241/Be-Quellen leichter zu interpretieren.

Bei einer Umstellung auf die neue Technologie wird dieses Argument zwar langfristig an Gewicht verlieren. Aktuell jedoch ist dies für die Dienstleister, die diese Vergleichsmessungen im Auftrag der Bohrloch- bzw. Kaverneneignern durchführen, noch ein Nachteil der neuen Technologie und teilweise durch die konkrete Auftragspezifikation ausgeschlossen. Andererseits zeigen aktuelle Software-Entwicklungen der letzten Jahre die Möglichkeiten auf, Messergebnisse von neuen Neutronengeneratoren direkt mit älteren Ergebnissen von Am-241/Be-Quellen zu vergleichen – auch wenn diese Möglichkeiten noch nicht flächendeckend in der Branche verfügbar sind.

Sicherung gegen unbefugten Gebrauch

Zur Vermeidung der unsachgemäßen Verbreitung radioaktiver Stoffe sind bei HRQ aufwendige Maßnahmen zum Diebstahlschutz bei Transport und Lagerung notwendig. Zudem ist die grenzüberschreitende Verbringung mit einigem organisatorischen Aufwand in Bezug auf Ab- und Anmeldung der Quellen bei den zuständigen Behörden und Stellen verbunden.

Die Maßnahmen zum Diebstahlschutz und zur meldekonformen grenzüberschreitenden Verbringung sind bei Neutronengeneratoren jedoch nicht wesentlich geringer als bei HRQ. Denn Neutronengeneratoren gelten in vielen Staaten (insbesondere in den USA, in denen die meisten Hersteller von Neutronengeneratoren ihren Sitz haben) als potentielle Zündtechnik für Kernwaffen⁵².

Die übrigen oben beschriebenen Technologien sind in diesem Punkt im Vorteil.

⁵² sogenannte „dual use technology“

5.8. Kerntechnik

Kernreaktoren gibt es in Deutschland einerseits zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität in Großkraftwerken und andererseits zu Schulungs- und Forschungszwecken.

Die Anfahrquellen in den zur Stromerzeugung betriebenen Kernkraftwerken werden für diesen Zweck nicht mehr benötigt, da in allen noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken das vorhandene Kernmaterial ausreicht, um den Reaktor nach einem Stillstand wieder anzufahren. Bei den vorhandenen Kalibrierquellen könnten gemäß den Ergebnissen unserer Anwenderbefragungen die HRQ durch Quellen geringerer Aktivität ersetzt werden. Im Hinblick auf die Restlaufzeiten der Kernkraftwerke halten wir einen Quellenaustausch mit Kosten für die Entsorgung der HRQ und für die Anschaffung neuer Quellen nicht verhältnismäßig, zumal der Diebstahlschutz der vorhandenen HRQ durch die vorhandenen Maßnahmen gegen die Entwendung radioaktiver Stoffe gewährleistet werden kann.

Neben den Kernkraftwerken sind zurzeit (Mitte 2020) noch sechs Forschungsreaktoren in Deutschland in Betrieb: vier Unterrichtsreaktoren mit einer thermischen Leistung zwischen 0,1 Watt und 2 Watt (in Dresden, Stuttgart, Furtwangen und Ulm) sowie zwei Forschungsreaktoren im Bereich von 100 kW (Mainz) und 20 MW (Garching). Die Unterrichtsreaktoren haben üblicherweise Anfahrquellen, deren Aktivität mehrere Größenordnungen unterhalb der jeweiligen HRQ-Grenze liegt.

Der Forschungsreaktor in Mainz verfügt über eine Am-241/Be-Quelle, deren Aktivität jedoch ebenfalls unterhalb der HRQ-Grenze liegt.

Der Forschungsreaktor in Garching verfügt über zwei Anfahrquellen. Die primäre Anfahrquelle besteht aus einer Cf-252-Quelle als Californium(III)-oxid, deren Anfangsaktivität unterhalb der neuen HRQ-Grenze (20 GBq) aber oberhalb der alten HRQ-Grenze (0,5 GBq) liegt. Diese Quelle muss aufgrund der Halbwertszeit von 2,6 Jahren regelmäßig ausgetauscht werden. Die sekundäre Anfahrquelle ist eine selbst regenerierende Antimon-Beryllium-Quelle mit einer maximalen Aktivität von 300 TBq Sb-124 (HRQ-Grenze: 40 GBq), die nur bei einem längeren Reaktorstillstand ausgetauscht werden muss⁵³.

Als Alternative für diese Anfahrquellen kommen prinzipiell Neutronengeneratoren in Betracht, die bereits im Abschnitt 5.7 beschrieben wurden. Sowohl in Bezug auf die Neutronenflussdichte als auch auf das Energiespektrum wären Neutronengeneratoren als Alternative zu HRQ geeignet. Nach Angaben der Betreiber der Forschungsreaktoren in Mainz und Garching sind diese Generatoren aufgrund der Bauform und der mangelnden Kompaktheit in einem Reaktor bisher nicht einsetzbar.

Da es im Bereich der Kerntechnik nur sehr vereinzelte HRQ gibt und keine vielversprechenden Alternativen vorhanden sind, wird der Bereich Kerntechnik im folgenden Technologievergleich (vgl. Abschnitt 6) nicht weiter betrachtet.

⁵³ Antimon-Beryllium-Quellen können sich im Neutronenfluss des Reaktors selbst regenerieren: Sb-124 hat eine Halbwertszeit von 60,2 Tagen und geht durch einen β^- -Zerfall in den angeregten Zustand von Te-124 über, welches beim Zerfall Gammastrahlung mit einer Energie von 1,69 MeV emittiert. Diese Gammastrahlung erzeugt im Beryllium durch (γ,n)-Reaktionen freie Neutronen, mit denen der Reaktor angefahren werden kann. Während des Reaktorbetriebs wird das stabile Isotop Sb-123 durch Neutronenabsorption in das kurzlebige Nuklid Sb-124 umgewandelt, so dass die Menge an Sb-124 trotz der Kurzlebigkeit nicht nachlässt. Auch nach Abschalten des Reaktors ist dadurch noch einige Monate lang genügend Sb-124 vorhanden, um den Reaktor erneut anzufahren.

6. Vergleich der Technologien

Die Tabelle im Abschnitt 4 der Anlage zu diesem Bericht bietet eine zusammenfassende Übersicht unseres Technologievergleichs. Damit stellen wir je Anwendungsbereich die Alternativtechnologien, die Bewertungskriterien, eine Bewertungsmatrix, ein Votum zur Machbarkeit sowie eine Prognose zum Zeithorizont für den Technologiewechsel dar.

Die Reihenfolge der in Spalte 1 genannten Anwendungsbereiche ist entsprechend der Anzahl der dort verwendeten HRQ (vgl. Abbildung 1) gewählt. In der zweiten Spalte ist als mögliches Kriterium für eine Priorisierung die radiologische Relevanz bzw. das relative Gesamtrisiko gemäß unserer Einschätzung im Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die Spalte 3 listet je Anwendungsbereich die im Abschnitt 5 beschriebenen Alternativtechnologien auf.

In der vierten Spalte folgt eine Matrix, bei der für jedes Bewertungskriterium eine Bewertungsziffer basierend auf unseren Literaturrecherchen und Anwenderbefragungen eingetragen ist. Dabei haben wir den aktuellen Stand der Technologien und nicht zukünftige, unvorhersehbare technologische Entwicklungen berücksichtigt. Die 5-teilige Bewertungsskala reicht dabei von der Ziffer 1 (die Alternativtechnologie ist gegenüber der HRQ-Technologie deutlich im Nachteil) bis zur Ziffer 5 (die Alternativtechnologie ist gegenüber der HRQ-Technologie deutlich im Vorteil).

In der fünften Spalte haben wir aus den Bewertungsziffern für jede Alternativtechnologie einen gewichteten Mittelwert gebildet, wobei wir die Gewichtung der Bewertungskriterien mit den Faktoren 3, 2 und 1 (essentiell, wichtig und nachgeordnet) ebenfalls auf Grundlage unserer Literaturrecherchen und Anwenderbefragungen ermittelt haben. Dabei spiegelt die Wichtung der Bewertungskriterien bewusst die Sicht der Anwender wieder, um die in der Praxis entscheidenden Hürden für einen Technologiewechsel in unserer Studie zu berücksichtigen. Dieser gewichtete Mittelwert ist umso größer je vorteilhafter die Alternativtechnologie gegenüber der HRQ-Technologie ist. Dieser Wert ist als alleiniges Kriterium für die Machbarkeit des Technologiewechsels jedoch nicht geeignet.

Daher haben wir in der Spalte 6 diese Machbarkeit daran gemessen, ob bei allen essentiellen Bewertungskriterien die Alternativtechnologie mindestens vergleichbar zur HRQ-Technologie ist. Denn falls in einem essentiellen Bewertungskriterium die Alternativtechnologie schlechter als die HRQ-Technologie bewertet ist, dann ist die Machbarkeit – vorbehaltlich zukünftiger technologischer Entwicklungen – nicht gegeben. Diese binäre Ja/Nein-Einstufung ist im Einzelfall aufgrund von besonderen Umständen jedoch zu vereinfachend. Daher haben wir zwischen die Kategorien „Ja – machbar“ und „Nein – nicht machbar“ noch zwei Zwischenkategorien „Ja – ggf. machbar“ und „Nein – ggf. machbar“ eingeführt für die Fälle, in denen die absehbare technologische Entwicklung zu einer Machbarkeit führen könnte. Details zu dieser Einschätzung haben wir textlich erläutert.

Da alle Technologien einem fortschreitenden Veränderungsprozess unterliegen ist nicht nur die derzeitige Machbarkeit des Technologiewechsels, sondern auch der Zeithorizont relevant, in dem dieser Wechsel voraussichtlich stattfinden kann. In der letzten Spalte haben wir daher einen Zeithorizont für die einzelnen Alternativtechnologien auf Basis unserer Befragungen abgeschätzt.

Für eine Priorisierung und Bewertung der Alternativtechnologien ist eine gemeinsame Betrachtung der Spalten 5 bis 7 (gewichtetes Bewertungsmittel, Machbarkeit und Zeithorizont) notwendig.

In den folgenden Unterabschnitten beschreiben wir für jedes Anwendungsgebiet die spezifischen Besonderheiten bei der Ermittlung der Bewertungsmatrix. Zudem erläutern wir das jeweils folgende Votum zur Machbarkeit und begründen unsere Einschätzung zum Zeithorizont für den Technologiewechsel.

6.1. Großkammerbestrahlung zur Sterilisation

Alle Sterilisationsmethoden müssen einerseits die Sterilisation im gesamten Produkt gewährleisten und andererseits das Produkt nicht durch Rückstände oder physikalisch-chemische Veränderungen schädigen. Diese Eigenschaften sind essentiell für die Frage der Eignung der Alternativtechnologien.

Bei der Produktkompatibilität kann nur die in Beschleunigeranlagen erzeugte Photonenstrahlung als gleichwertig zur HRQ-Technologie angesehen werden. Die Gassterilisation mit Ethylenoxid ist an gasdurchlässige Verpackungen bzw. Produkte gebunden und die Elektronenstrahlung hat für Produkte ab einer gewissen Größe oder Dichte eine zu geringe Reichweite.

Bei dem Kriterium Dosishomogenität sind die alternativen Bestrahlungstechniken mit Elektronen und hochenergetischen Photonen durch den sich negativ auswirkenden Aufbaueffekt in der Tiefendosis-kurve – wie im Abschnitt 5.1 bereits beschrieben – im Nachteil, wobei dieser Effekt bei der eher kurzreichweitigen Elektronenstrahlung noch größer ist. Auch bei Bestrahlungen von mehreren Seiten ist die Dosishomogenität bei den alternativen Technologien limitiert.

Das Risiko von Produktbeeinträchtigungen ist bei allen Sterilisationstechniken gegeben. Technische Maßnahmen können dieses Risiko sowohl bei der Gassterilisation mit Ethylenoxid (durch Spülung der Sterilisationskammer) als auch bei den Bestrahlungstechniken (durch Begrenzung der Dosis und der Strahlungsenergie) minimieren. Bei diesem Bewertungskriterium können wir keine allgemeinen Vor- oder Nachteile einer bestimmten Technologie erkennen, auch wenn bei einem spezifischen zu sterilisierenden Produkt natürlich die konkreten Spezifikationen die Verwendung der einen oder anderen Technologie erfordern.

Ein betriebswirtschaftlicher Gesamtkostenvergleich der verschiedenen Technologien ist im Rahmen dieser Studie wie im Abschnitt 5.1 beschrieben kaum möglich. Größere Anschaffungskosten stehen größeren laufenden Kosten gegenüber. Wir gehen daher von einem vergleichbaren Kostenniveau der Technologien aus. Bei derart großen und aufwändigen Industrieanlagen ist allerdings zu bedenken, dass im Gegensatz zu einer kleinen Messstelle in der Prozessüberwachung eine vollständige Umstellung der Sterilisationstechnologie extrem aufwendig und teuer ist, da von größeren baulichen Maßnahmen ausgegangen werden muss.

Beim Vergleich des Durchsatzes ist die Gassterilisation gegenüber allen Bestrahlungstechniken deutlich im Nachteil, da die Spülung der Sterilisationskammer zur Entfernung des Ethylenoxids mehrere Tage dauern kann. Die Elektronenbeschleuniger können prinzipiell aufgrund der höheren Dosis pro Volumen einen größeren Durchsatz liefern als die anderen Bestrahlungstechniken; allerdings werden Elektronenbestrahlungen häufiger bei kleineren Packungsgrößen eingesetzt [21].

Die Ausfallzeiten bei Beschleunigeranlagen durch Reparaturen und Wartungen sind aufgrund der komplexeren Technik höher als bei HRQ-Bestrahlungsanlagen oder bei Gassterilisationsanlagen, was einen deutlichen Nachteil für den kontinuierlichen Betrieb und die gleichmäßige Auslastung bedeutet.

Beschleunigeranlagen sind in Bezug auf den Arbeitsschutz jedoch vergleichsweise sicher, da mit einfachen Not-Aus-Schaltern die Anlagen und damit die Strahlung abgeschaltet werden kann. Bei HRQ-Bestrahlungsanlagen lassen sich die Quellen zwar in eine abgeschirmte Position bringen; die prinzipielle Gefährdung einer unbeabsichtigten Bestrahlung besteht aber nach wie vor. Bei Gassterilisationsanlagen ist hingegen die Verwendung des toxischen und hochentzündlichen Ethylenoxids eine nicht einfach abschaltbare Gefahrenquelle. Sowohl technische Maßnahmen (wie automatische Gasspüleinrichtungen) als auch organisatorische Maßnahmen (wie das Tragen persönlicher Schutzausrüstung) sind daher erforderlich [21].

Votum und Prognose

Elektronenbestrahlung und Gassterilisation können die Großkammerbestrahlung mit HRQ nicht vollständig ersetzen, da bei bestimmten Produkten die oben beschriebenen Einschränkungen eine homogene Sterilisation technisch unmöglich machen. Prinzipiell ist die Bestrahlung mit in Beschleunigeranlagen erzeugten hochenergetischen Photonen als Alternativtechnologie anwendbar wenn die Dosishomogenität gewährleistet werden kann. Allerdings stehen die bei Beschleunigeranlagen höheren Anschaffungskosten und Ausfallzeiten einem Technologiewechsel entgegen.

Da es sich bei den meisten HRQ-Bestrahlungsanlagen um großtechnische Sterilisationsanlagen mit entsprechender logistischer Infrastruktur handelt, ist eine Umstellung der Sterilisationstechnologie für die Betreiber mit einem erheblichen Investitionsaufwand durch bauliche und technische Veränderungen verbunden. Zudem geht eine Umstellung von HRQ-Technologie auf Beschleunigertechnologie mit einem hohen Zeit- und Personalaufwand für die erneute Dosis-Charakterisierung jedes Produkts einher, um die Vorgaben der europäischen Medizinprodukteverordnung [32] bzgl. der Qualität der Sterilisation einzuhalten.

Eine vollständige Ablösung der HRQ-Technologie in diesem Bereich halten wir daher allenfalls langfristig für realistisch. So lange für einen Großteil der bisher bestrahlten Produkte keine vergleichbaren Alternativen zur Verfügung stehen, werden die Betreiber von Sterilisationsanlagen die Bestrahlung mit HRQ in ihrem Dienstleistungsportfolio behalten.

6.2. Teletherapie

Bei der Wahl der Methode für die Teletherapie im Kopf-Hals-Bereich ist für die Anwender weniger die mögliche Vermeidung von HRQ als vielmehr die medizinische Effektivität sowie die Zuweiser-, die Kosten- und die Abrechnungsstruktur relevant.

Die medizinische Effektivität hängt entscheidend von der Indikation und den individuellen Patientendaten ab. Im Gegensatz zu der noch vergleichsweise jungen, aber prinzipiell effektiven Technik mit Protonenbeschleunigern gibt es zwischen den länger etablierten Verfahren mit Elektronenbeschleunigern und GammaKnife®-Geräten bereits viele Vergleichsstudien und mehrere HTA-Berichte. Obwohl die HTA-Berichte des DIMDI [22] und des LBI [23] die unzureichende Qualität vieler bisheriger Studien bemängeln und weitere qualitativ hochwertige Studien einfordern, können wir zurzeit nur von einer Gleichwertigkeit beider Verfahren ausgehen.

Bei der Verfügbarkeit in der Fläche und bei den Kosten sind die Protonenbeschleuniger zurzeit noch keine Alternative für GammaKnife®-Geräte. Die Elektronenbeschleuniger sind in der Fläche verfügbar und bzgl. einer Gesamtkostenbetrachtung aufgrund der multiplen Nutzungsmöglichkeiten nicht schlechter zu bewerten als die Teletherapie mit HRQ.

Votum und Prognose

Der Ersatz von HRQ in der Teletherapie durch Beschleunigeranlagen ist technisch machbar. Bei den Protonenbeschleunigern sind jedoch einschränkend die zurzeit noch nicht flächendeckende Verfügbarkeit und die vergleichsweise hohen Kosten zu berücksichtigen. Daher erwarten wir, dass Protonenbeschleuniger nur langfristig GammaKnife®-Geräte ersetzen können. Eine mittelfristige Ersetzung durch Elektronenbeschleuniger innerhalb der nächsten 10 Jahre ist technisch möglich. Allerdings bedarf es dazu – wie im Abschnitt 5.2 dargestellt – noch weiterer technologischer Fortschritte bei den Elektronenbeschleunigern im Bereich der kleinen Zielvolumina. Zudem müssen laufend die vergleichenden Studien zur medizinischen Effektivität berücksichtigt werden, da in der Medizin der Therapieerfolg besonders hoch zu bewerten ist.

Neben der Förderung der medizinischen Forschung und der Beschleunigertechnologie sind Anreize bei der Vernetzung der verschiedenen medizinischen Fachrichtungen vielversprechend. Bei einer engeren Zusammenarbeit zwischen den Fachrichtungen Neurochirurgie und Strahlentherapie ist es denkbar, dass als Alternative zum invasiven chirurgischen Eingriff anstatt der HRQ-Technologie häufiger die Bestrahlung mit Beschleunigeranlagen gewählt wird.

6.3. Prozessüberwachung

Die Anwendbarkeit der dargestellten Alternativtechnologien für Füllstandsmessungen und Dicken- bzw. Flächengewichtsmessungen hängt direkt von der jeweiligen Messaufgabe ab, weshalb ein pauschaler Vergleich der Technologien nur bedingt möglich ist. Selbst die Wichtung der dargestellten Bewertungskriterien ist von der konkreten Messaufgabe abhängig.

Füllstandsmessung

Für den Anwender von Füllstandsmessungen liegt der Fokus bei den Anforderungen an das Messsystem erfahrungsgemäß bei der Eignung der Alternativtechnologie für die jeweiligen äußeren Bedingungen und Messgutbedingungen und der damit verbundenen Ausfallsicherheit. So sind beispielsweise Füllstandsmessungen, die als Schranken Signale vor der Überfüllung von Silos geben sollen, häufig mit automatischen Schalthandlungen versehen. Dem Anwender ist daher an einer möglichst hohen Ausfallsicherheit gelegen.

Je nach Anwendungsgebiet kann außerdem die Messgenauigkeit für den Anwender relevant sein, wenn gemessene Füllstände beispielsweise für ein Mischungsverhältnis herangezogen werden und somit direkte Auswirkungen auf die Qualität des Endprodukts haben. Unsere Befragungen von Anwendern haben ergeben, dass für viele Messaufgaben individuell Messsysteme mit vergleichbarer Messgenauigkeit angeboten werden. Es kann jedoch in Abhängigkeit der äußeren Bedingungen ein höherer Wartungsaufwand auftreten.

Bei einigen Messaufgaben kann es notwendig sein, dass die Füllstandsmessung kontaktlos erfolgt. Dies kann beispielsweise aufgrund von Hygieneanforderungen nötig sein. Von den dargestellten Alternativtechnologien erfordern Schwimmer den größten Eingriff in die Behälter. Radar- bzw. Mikrowellenrückstreuung können hingegen – wie radiometrische Messeinrichtungen – gänzlich kontaktlos betrieben werden. Bei den anderen dargestellten Alternativtechnologien sind hingegen üblicherweise Teile der Messtechnik in den Behältern angebracht.

Die einmaligen Kosten liegen für die von uns dargestellten Alternativtechnologien im Vergleich zu den radiometrischen Messeinrichtungen in ähnlicher Höhe. Die laufenden Kosten bzw. Folgekosten hängen für die Alternativtechnologien direkt mit dem Wartungsaufwand zusammen und liegen nach den Ergebnissen unserer Befragungen unter Berücksichtigung der Strahlenschutzorganisation und der Kosten für einen Austausch der radioaktiven Quelle unter den laufenden Kosten für radiometrische Messeinrichtungen.

Beim Einsatz von Radar- bzw. Mikrowellenrückstreuung ist zwar auch der Einsatz von elektromagnetischer Strahlung erforderlich. Im Gegensatz zur radiometrischen Messeinrichtung kann die Strahlenquelle jedoch ausgeschaltet werden. Bei induktiven und kapazitiven Messeinrichtungen sehen wir hingegen ein Gefahrenpotential in der Arbeitssicherheit durch elektromagnetische Felder. Diese lassen sich allerdings ebenfalls im Bedarfsfall deaktivieren. Die geringsten Gefahren gehen von Messsystemen mit Schwimmer und hydrostatischen Messungen aus.

Dicken- bzw. Flächengewichtsmessung

Bei der Dicken- bzw. Flächengewichtsmessung liegt üblicherweise der Fokus der Anwender auf der Genauigkeit der Messung. Ebenfalls für den Anwender essenziell ist die Eignung der Alternativtechnologie bei den jeweiligen äußeren Bedingungen und Messgutbedingungen. Beispielsweise lassen sich Messungen mit Laserrückstreuung nicht bei der Dickenmessung glühender Stahlbrammen einsetzen.

Nach Angaben der von uns befragten Anwender werden für viele Messaufgaben individuelle Messsysteme mit vergleichbarer Messgenauigkeit angeboten. Analog zu den Alternativtechnologien für Füllstandsmessungen spielt für die Anwender hierbei jedoch der Aufwand für Wartungen eine bedeutende Rolle.

Die einmaligen hauptsächlich durch die Anschaffung und Installation bedingten Kosten liegen für die von uns dargestellten Alternativtechnologien im Vergleich zu den radiometrischen Messeinrichtungen in vergleichbarer Höhe. Relevanter für den Anwender sind in der Regel die laufenden Kosten bzw. die Folgekosten. Diese hängen für die Alternativtechnologien direkt mit dem Wartungsaufwand zusammen und liegen nach den Ergebnissen unserer Befragungen unter Berücksichtigung der Kosten für die Strahlenschutzorganisation und der Kosten für einen Austausch der radioaktiven Quelle unter den laufenden Kosten für radiometrische Messeinrichtungen.

Da alle von uns dargestellten Alternativtechnologien kontaktlos funktionieren, sehen wir diesbezüglich eine Gleichwertigkeit zu radiometrischen Messeinrichtungen.

Bei Röntgenanlagen kommt, wie bei radiometrischen Messeinrichtungen, ionisierende Strahlung zum Einsatz, wodurch im angeschalteten Zustand ein ähnliches Gefährdungspotential entsteht. Bei Messsystemen mit Laserrückstreuung geht die Gefährdung von der Laserstrahlung aus, während bei induktiven und kapazitiven Messungen elektromagnetische Felder wirken. Diese vier dargestellten Alternativtechnologien haben jedoch gemein, dass das Gefährdungspotential nach dem Ausschalten verschwindet, weshalb wir jeweils einen Vorteil gegenüber der radiometrischen Messeinrichtung unter dem Aspekt der Sicherheit sehen.

Votum und Prognose

Der Ersatz der HRQ in der Prozessüberwachung kann je nach Messaufgabe technisch realisierbar sein. Für die Anwendungen, bei denen die Messgutbedingungen und die äußeren Bedingungen kein einschränkendes Kriterium darstellen, halten wir einen mittelfristigen Ersatz der HRQ für technisch und wirtschaftlich machbar. Es bleibt allerdings nach unseren Befragungsergebnissen festzuhalten, dass viele Anwender die Vermeidung von HRQ nicht als dringlich einstufen, da sie häufig im Umgang mit Gefahrstoffen geübt sind. Die Rechtfertigung des Einsatzes von HRQ muss im Bereich der Prozessüberwachung im Einzelfall geprüft werden, um die speziellen Umstände der konkreten Messaufgabe zu berücksichtigen.

6.4. Gammaradiographie

Im Bereich der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist zur Volumenprüfung⁵⁴ von Bauteilen die Durchführung von Durchstrahlungsprüfungen mit Gammaradiographiegeräten seit langem etabliert. Die Gammaradiographie ist ein bildgebendes zerstörungsfreies Prüfverfahren, das im Wesentlichen mit der Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenanlagen vergleichbar ist. Vorteile der Durchstrahlungsprüfung mit HRQ sind der flexible Einsatz der sehr robusten Gammaradiographiegeräte, die relativ einfache Handhabung und Bedienbarkeit dieser Geräte sowie das aufgrund der kürzeren Wellenlänge der Strahlung größere Durchdringungsvermögen.

Im Folgenden werden die Durchstrahlungsprüfungen mit Röntgenanlagen und Linearbeschleunigern sowie weitere Zerstörungsfreie Prüfverfahren wie die Ultraschallprüftechnik und deren Weiterentwicklungen (Phased Array, TOFD, EMAT) sowie die aktive Thermographie der Gammaradiographie gegenübergestellt. Allen Verfahren gleich ist der Versuch, Informationen über den Zustand im Inneren eines Bauteils zu bekommen, indem man das Bauteil von einer Seite mit unterschiedlichen physikalischen Wellen beaufschlagt und anschließend die Durchdringung bzw. Reflexion an Hindernissen betrachtet. In der Praxis ergeben sich allerdings verfahrensbedingt große Unterschiede zwischen den Methoden, die im Folgenden genauer erläutert werden.

Röntgenanlagen

Das Prinzip der Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenanlagen ist der Gammaradiographie sehr ähnlich und es lassen sich mit beiden Prüfverfahren nahezu gleichwertige Durchstrahlungsaufnahmen anfertigen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Erzeugung der das Bauteil durchdringenden Strahlung. Da die üblichen zur Durchstrahlungsprüfung eingesetzten Radioisotope in der Regel größer sind als die Brennflecke von Röntgenanlagen haben letztere den Vorteil, dass die in Normen und Regelwerken geforderten Bildgütezahlen mit ihnen einfacher zu erreichen sind.

Die Größe des Brennflecks ist in der Praxis auch der Grund, warum einige Anwender Se-75-Strahler verwenden, in denen der radioaktive Stoff als gepresstes Pulver vorliegt, anstatt die Se-75-Strahler in metallischer Form obwohl erstere ein höheres Dispersionspotential besitzen. In der Pulverform ist die Aktivitätsdichte des Se-75 höher als in der metallischen Form, so dass dadurch bei gleicher Aktivität ein geringerer Brennfleck entsteht. Die erreichbaren Bildgütezahlen bei Verwendung dieser Se-75-Strahler sind besser als bei der Verwendung von Ir-192-Strahlern und fast so gut wie die Bildgütezahlen bei Röntgenanlagen.

Betrachtet man die Anschaffungskosten von Röntgenanlagen im Vergleich zu Gammaradiographiegeräten so ergibt sich ein Nachteil für Röntgenanlagen, da selbst luftgekühlte Röntgenanlagen für den mobilen Einsatz, die vom Einsatzzweck her den Gammaradiographiegeräten mit den Isotopen Se-75 oder Ir-192 ähneln, etwa zwei- bis dreimal teurer sind. Bei stationären, wassergekühlten Röntgenanlagen für längere Einsatzzeiten erhöht sich dieser Faktor noch einmal deutlich auf etwa fünf. Leichte Vorteile für die Röntgenanlagen ergeben sich allerdings bei den laufenden Kosten, wenn man die Kosten für den zum Betrieb der Röntgenröhren notwendigen Strom den Kosten für den regelmäßigen Austausch der Isotope⁵⁵ gegenüberstellt.

⁵⁴ Der Begriff „Volumenprüfung“ bezeichnet in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung alle Untersuchungen, die nicht nur Prüfaussagen über die Oberfläche von Bauteilen, sondern auch in der räumlichen Tiefe erlauben.

⁵⁵ Se-75-Quellentausch: ca. 1x pro Jahr bei 5 000 bis 6 000 Euro pro Quelle
Ir-192-Quellentausch: ca. 2x pro Jahr bei 2 000 bis 3 000 Euro pro Quelle
Co-60-Quellentausch: nach 5 bis 10 Jahren (ca. 30 000 Euro pro Quelle)

Die Prüfgeschwindigkeit der beiden Verfahren zur Durchstrahlungsprüfung von Bauteilen ist nahezu gleich. Durch das geringere Gewicht von Gammaradiographiegeräten im Vergleich zu Röntgenanlagen ergeben sich bei schwer zugänglichen Prüforten, z. B. auf einem Gerüst, in der Summe über alle möglichen Prüforten leichte Vorteile für die Gammaradiographie. Auch bei rauen Umgebungsbedingungen, z. B. bei einem Einsatz im freien Gelände, haben die Gammaradiographiegeräte aufgrund ihrer Robustheit Vorteile gegenüber Röntgenanlagen. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil ist auch, dass bei Gammaradiographiegeräten kein Stromnetz oder Stromerzeugungsaggregat zur Verfügung stehen muss.

Bei der Abhängigkeit vom Prüfobjekt ergeben sich bei Röntgenanlagen aufgrund des identischen physikalischen Prinzips kaum Nachteile gegenüber Gammaradiographiegeräten; allerdings lassen sich mit Gammaradiographiegeräten aufgrund der größeren Durchdringungsfähigkeit der Strahlung dickere Bauteile untersuchen.

Da beide Prüftechniken in den gleichen Normen beschrieben sind⁵⁶, lassen sich diesbezüglich keine Vor- oder Nachteile ableiten.

Beschleunigeranlagen

Elektronen-Linearbeschleuniger zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung bieten durch die Erzeugung von Röntgenstrahlen mit Energien im unteren MeV-Bereich⁵⁷ die Möglichkeit zur Durchstrahlung von Bauteilen mit großen Wandstärken. Vergleichbar sind sie daher eher mit Gammaradiographiegeräten, die mit Co-60-Strahlern⁵⁸ betrieben werden. Die Anschaffungskosten für einen Beschleuniger und auch für den notwendigen Bestrahlungsbunker sind allerdings deutlich höher als bei einem kompakten Gammaradiographiegerät. Ebenfalls deutlich nachteilig wirken sich die laufenden Kosten der vergleichsweise nicht so robusten Beschleuniger aus, da neben den Energiekosten noch die laufenden Kosten für Wartungen und Reparaturen berücksichtigt werden müssen.

Bei der Prüfgeschwindigkeit gibt es kaum Unterschiede, da bei beiden Prüftechniken das gleiche physikalische Prinzip verwendet wird. Bei den Umgebungsbedingungen stellt sich als klarer Nachteil heraus, dass Beschleuniger nicht ortsflexibel eingesetzt werden können und durch die hohe Energie der Strahlung an den Betrieb in abgeschirmten Bestrahlungsbunkern gebunden sind.

Mit Beschleunigern kann man Bauteile nur von außen mit Strahlung beaufschlagen und nicht wie mit Röntgenröhren – insbesondere mit Rundstrahl-Röntgenröhren – oder mit Gammaradiographiegeräten auch von innen. Beispielsweise ist bei der Durchstrahlungsprüfung von Rohrrundnähten aber gerade die Aufnahmeanordnung, bei der ein Röntgenfilm außen um die Schweißnaht gelegt wird und durch die innen positionierte Strahlenquelle belichtet wird, vorteilhaft. Obwohl mit Beschleunigern höhere Wandstärken durchstrahlt werden können als mit Röntgenröhren oder Isotopen wird hier die Abhängigkeit vom Prüfobjekt insgesamt als leichter Nachteil gegenüber der Durchstrahlung mit Gammaradiographiegeräten bewertet.

Da die Durchstrahlungsprüfung mit Beschleunigern in den gleichen Normen wie die mit Röntgenanlagen und Gammaradiographiegeräten geregelt ist, sind diesbezüglich keine Vor- oder Nachteile erkennbar.

⁵⁶ z. B. die Normen-Reihe DIN EN ISO 17636

⁵⁷ Typische Gamma-Energie: 6 MeV

⁵⁸ Gamma-Energien: 1,33 MeV und 1,17 MeV

Aktive Thermographie

Die Thermographie nutzt die Aussendung von Wärmestrahlung der zu prüfenden Gegenstände aus um z. B. Wärmebrücken in Gebäuden (Bauthermographie) oder sich durch zu hohe Ströme erwärmende Teile in elektrischen Schaltschränken (Elektrothermographie) zu erkennen. Für die aktive Thermographie ist eine Anregung der zu prüfenden Bauteile mit Wärme notwendig. Durch einen gerichteten Wärmefluss durch das Bauteil können Fehlstellen, die den gleichmäßigen Wärmefluss behindern mit Thermographiekameras erkannt werden. Geeignet ist das Prüfverfahren für oberflächennahe dreidimensionale Fehler, flächige Fehler wie Delaminationen, fehlende Anbindung bei Schweißnähten oder das Fehlen von Faserlagen bei Faserverbundwerkstoffen.

Die Anschaffungskosten für eine Thermographiekamera fallen je nach Leistungsfähigkeit (z. B. Bildauflösung) und Einsatzzweck unterschiedlich aus, liegen aber in den meisten Fällen deutlich unter den Kosten für Gammaradiographiegeräte, sodass sich hier ein deutlicher Vorteil ergibt. Auch bei den laufenden Kosten liegt der Betrieb von Thermographiekameras deutlich unter dem Betrieb für Isotopenwechsel bei Gammaradiographiegeräten.

Bei der Prüfgeschwindigkeit ist ein leichter Vorteil für die aktive Thermographie festzustellen, da mit diesem Prüfverfahren auch größere Bereiche schnell erfasst werden können, vorausgesetzt der notwendige Wärmeeintrag in das Bauteil kann entsprechend realisiert werden. Da der notwendige Wärmeeintrag und der daraus resultierende Wärmefluss im Bauteil abhängig ist von äußeren Einflüssen wie Sonneneinstrahlung oder Wind, ist in Bezug auf die notwendigen Umgebungsbedingungen die aktive Thermographie als Alternative zur HRQ-Technologie deutlich im Nachteil.

Die aktive Thermografie ist vom Spektrum der prüfbaren Bauteile auf homogene, dünnwandige Bauteile einfacher Geometrie beschränkt. Aufgrund dieser Tatsache bewerten wir die Abhängigkeit vom Prüfobjekt als deutlichen Nachteil.

Zwar gibt es seit einigen Jahren allgemeine Normen zu Geräten und zur Durchführung der aktiven Thermographie⁵⁹, allerdings fehlen zurzeit noch produktspezifische Anwendungsnormen.

Klassischer Ultraschall

Die klassische Ultraschallprüfung ist seit langem neben der Durchstrahlungsprüfung als zerstörungsfreies Prüfverfahren etabliert. Der Anwendungsbereich der beiden Prüfverfahren ist überlappend und in erster Linie von der zu prüfenden Wandstärke abhängig.

Die Anschaffungskosten eines Prüfgerätes zur klassischen Ultraschallprüfung liegen etwas unter denen von Gammaradiographiegeräten. Die klassische Ultraschallprüfung ist allerdings in Bezug auf die laufenden Kosten wesentlich günstiger. Diese belaufen sich auf geringe Stromkosten für den Betrieb des Ultraschallgerätes und auf den gelegentlichen verschleißbedingten Ersatz eines Prüfkopfes.

Die Prüfgeschwindigkeit der klassischen Ultraschallprüfung ist im Vergleich zur Gammaradiographie deutlich geringer, da die Prüfbereiche in der Regel mit zwei Prüfköpfen in unterschiedlichen Einschallwinkeln geprüft werden müssen, was vergleichsweise zeitaufwändig ist.

Die Bewertung hinsichtlich der einschränkenden Umgebungsbedingungen ist pauschal schwierig, da dies oft vom Einzelfall abhängig ist. Gammaradiographiegeräte benötigen keine Stromversorgung im Gegensatz zu Ultraschallprüfgeräten⁶⁰. Zudem sind Gammaradiographiegeräte etwas robuster und mechanisch unempfindlicher als klassische Ultraschallprüfgeräte (und deren Weiterentwicklungen).

⁵⁹ z. B. DIN EN 17119 [37]

⁶⁰ Klassische Ultraschallgeräte sind oftmals mit einem Akku verwendbar; die weiterentwickelten Ultraschalltechniken (Phased Array, TOFD, EMAT) benötigen meist noch eine externe Stromversorgung.

Dies fällt bei einem bestimmungsgemäßen Betrieb beider Gerätetypen normalerweise nicht ins Gewicht. Allerdings zeigen unsere Erfahrungen und Befragungen, dass einige Prüfer in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung einen wenig sorgsamem Umgang mit dem Equipment pflegen. Bei unseren Bewertungen gehen wir jedoch von einem sorgsamem Gebrauch aus und können daher keinen eindeutigen Nachteil von Ultraschallprüfgeräten gegenüber Gammadiographieräten erkennen. Andererseits benötigen Gammadiographieräte zur Gewährleistung des Strahlenschutzes eine Absperrung um den Prüfort herum, um den notwendigen Abstand zu gewährleisten. Dies kann dazu führen, dass die Durchstrahlungsprüfung nur während eines Stillstandes in diesem Betriebsbereich durchgeführt werden kann. In Bezug auf die Umgebungsbedingungen sind klassische Ultraschallprüfgeräte in der Summe der Bedingungen technisch leicht im Vorteil gegenüber Gammadiographieräten.

Da es für Ultraschallprüfgeräte eine große Anzahl von Prüfköpfen für verschiedene Einsatzzwecke gibt, ist die klassische Ultraschallprüfung ab zu prüfenden Wandstärken von ca. 8 mm sehr umfangreich und universell einsetzbar, was wir als deutlichen Vorteil werten. Bei Wandstärken unterhalb von 8 mm wirkt sich allerdings negativ aus, dass sich in diesem Bereich unter dem Prüfkopf ein sogenanntes Nahfeld mit physikalisch nicht eindeutigen Schallverhältnissen ausbildet, was eine Bewertung von Anzeigen nahezu unmöglich macht. Zudem benötigen Ultraschallprüfgeräte eine gleichmäßige Prüffläche und einen durch Wasser, Öl oder Gel hergestellten Oberflächenanschluss zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt. Trotzdem bewerten wir die Ultraschalltechnik bei der Abhängigkeit vom Prüfobjekt als insgesamt leicht vorteilhaft, da nach unseren Erfahrungen und Anwenderbefragungen diese Technik in der Mehrzahl der Anwendungsfälle flexibler einsetzbar ist als Gammadiographieräte.

Im Bereich der Normung sind umfangreiche Produkt- und Anwendungsnormen vorhanden, sodass hier kein Vor- oder Nachteil gegenüber der Gammadiographie erkennbar ist.

Phased Array Ultraschall

Eine schon seit langem aus der Medizintechnik bekannte Weiterentwicklung der Ultraschallprüfung ist die Phased Array Ultraschallprüfung. Inzwischen wird diese Prüftechnik auch im technischen Bereich umfangreich eingesetzt. Grundsätzlich gelten für die Phased Array Ultraschallprüfungen die gleichen Voraussetzungen und Bedingungen wie für die oben beschriebenen klassischen Ultraschallprüfungen.

Eine Phased Array Ultraschallausrüstung ist deutlich aufwändiger und teurer als klassische Ultraschallgeräte. Die Phased Array Prüfköpfe bestehen aus einer Matrix von Piezokristallen zur Schallerzeugung, die einzeln zeitverzögert angeregt werden, um unterschiedliche Einschallwinkel zu erzielen. Häufig werden Phased Array Ultraschallköpfe mechanisiert über die Prüffläche verfahren und gleichzeitig werden die Prüfdaten gespeichert, um sie später detailliert auswerten zu können. Insgesamt ergibt sich dadurch bei den Anschaffungskosten ein leichter Nachteil gegenüber der Prüfung mit Gammadiographieräten. Die laufenden Kosten fallen allerdings wie bei der klassischen Ultraschallprüfung sehr gering aus.

Deutlich nachteilig auf die Prüfgeschwindigkeit wirkt sich aus, dass zum Erfassen eines Prüfvolumens der Bereich auf der Oberfläche des Bauteils erst abgefahren werden muss, während mit der Gammadiographie die Belichtung eines Films häufig ausreicht.

Wie bei klassischen Ultraschallprüfungen ist der Transport und der Betrieb von Phased Array Ultraschallprüfgeräten in der Summe etwas weniger eingeschränkt durch die Umgebungsbedingungen und dadurch leicht im Vorteil gegenüber der Gammadiographie.

Die Abhängigkeit vom Prüfobjekt ist pauschal nur schwer zu bewerten, da dies immer vom konkreten Objekt und von der konkreten Fragestellung abhängt. Beispielsweise ist die Phased Array

Ultraschallprüfung bei der Prüfung von Schweißnähten häufig flexibler einsetzbar als Gamma-radiographiegeräte. Bei schlechten Platzverhältnissen sind vollständige Schweißnahtprüfungen häufig nur durch Phased Array Ultraschallprüftechnik mit sehr flachen Prüfkopfmanipulatoren möglich. Daher wird die Abhängigkeit vom Prüfobjekt hier insgesamt mit einem leichten Vorteil gegenüber der Gamma-radiographie bewertet.

Da es sich bei der Phased Array Ultraschallprüftechnik um eine relativ neue Prüftechnik handelt, sind noch vergleichsweise wenige Produkt- und Anwendungsnormen vorhanden, die diese Prüftechnik berücksichtigen, was wir als leichten – aber zukünftig behebbaren – Nachteil werten.

TOFD Ultraschall

Das TOFD⁶¹ Verfahren ist ein Ultraschallprüfverfahren das zur Prüfung von Schweißnähten in Umfangs- oder Längsrichtung eingesetzt wird. Durch den Einsatz von zwei Ultraschallprüfköpfen die halb- oder teilmechanisiert in einem festen Abstand voneinander über das Bauteil bewegt werden, lassen sich Fehler gut in ihrer Ausdehnung und Tiefenlage beschreiben. Häufig wird das TOFD Verfahren in Kombination mit anderen Ultraschallprüfverfahren eingesetzt.

Die Anschaffungskosten von TOFD Prüfgeräten liegen etwa in dem Bereich von Phased Array Ultraschallgeräten und damit über den Anschaffungskosten von Gamma-radiographiegeräten. Die laufenden Kosten fallen allerdings wie bei der klassischen Ultraschallprüfung und der Phased Array Ultraschallprüfung vergleichsweise gering aus.

Die Prüfgeschwindigkeit ist wie beim Phased Array Ultraschall deutlich geringer, weil zum Erfassen der Schweißnaht die Prüfköpfe erst über den gesamten Prüfbereich bewegt werden müssen, während mit der Gamma-radiographie die Belichtung eines Films häufig ausreicht. Ebenso wie beim klassischen und beim Phased Array Ultraschall ist der Transport und der Betrieb von TOFD Ultraschallprüfgeräten in der Summe etwas weniger eingeschränkt durch die Umgebungsbedingungen und dadurch leicht im Vorteil gegenüber der Gamma-radiographie.

Da sich der Einsatz der TOFD Prüftechnik auf Schweißnähte beschränkt und in der Regel noch ein weiteres Ultraschallverfahren zur vollständigen Prüfung notwendig ist, bewerten wir diese Technik in Bezug auf die Abhängigkeit vom Prüfobjekt als deutlich nachteilig. Ebenfalls als nachteilig wirkt sich die zurzeit noch nicht so weite Verbreitung der Prüftechnik in einschlägigen Normen und Regelwerken aus.

EMAT

Bei dem Prüfverfahren EMAT⁶² wird eine Ultraschallprüfung nach dem Impuls-Echo-Verfahren realisiert, bei der die Erzeugung des Ultraschalls durch gepulste Elektromagnete direkt im Bauteil erfolgt. In jüngster Vergangenheit wurde das Verfahren, das in erster Linie zur Wandstärkenmessung, Korrosions- und Erosionsmessung oder zur Rissprüfung eingesetzt wird, zu Online-Prüfung von mit Laserstrahlung geschweißten Rohren weiterentwickelt.

Die Anschaffungskosten von auf dem EMAT-Verfahren basierenden Prüfgeräten liegen über den Kosten für Gamma-radiographiegeräte. Die laufenden Kosten sind allerdings wie bei den anderen Ultraschallverfahren vergleichsweise gering.

In Bezug auf die Kriterien Prüfgeschwindigkeit und Umgebungsbedingungen gelten die gleichen Umstände und Bewertungen wie bei der TOFD Prüftechnik.

⁶¹ Time Of Flight Diffraction (Beugungslaufzeittechnik)

⁶² Electro-Magnetic Acoustic Transducer (Elektromagnetischer Schallwandler)

Deutlich nachteilig bei der Abhängigkeit vom Prüfobjekt wirkt sich aus, dass mit dem EMAT-Verfahren zwar wie oben beschrieben in einem speziellen Anwendungsfall laserstrahlgeschweißte Rohre geprüft werden können, eine der Gammaradiographie vergleichbare Einsetzbarkeit zur Schweißnahtprüfung aber noch nicht gegeben ist. Dementsprechend sind für dieses Verfahren auch noch keine gleichwertigen Anwendungs- und Produktnormen vorhanden.

Votum und Prognose

Nach unseren Recherchen und Befragungen können die oben genannten Alternativtechnologien die Durchstrahlungsprüfung mittels Gammaradiographie unter der Verwendung von HRQ kurzfristig nicht vollständig und mittelfristig auch nur in bestimmten Teilbereichen ersetzen. Bedingt durch die unterschiedlichen Prüfobjekte und die daraus entstehenden Einschränkungen kann aber die kombinierte Anwendung mehrerer Alternativtechnologien die HRQ langfristig vollständig ersetzen. Es werden jedoch voraussichtlich immer Einzelfälle und spezielle Aufgabenstellungen existieren, bei denen die Anwendung von HRQ alternativlos ist.

Doch neben den technischen Aspekten der verschiedenen Technologien ist die über Jahrzehnte gewachsene Personalstruktur bei der Gammaradiographie nicht zu unterschätzen. Die Prüfer in diesem Bereich sind mehrheitlich keine Ingenieure, sondern in einem technischen Beruf ausgebildete und in Durchstrahlungsprüfungen angelernte Techniker. Diese Prüfer profitieren von der im Vergleich mit Röntgen- und Ultraschallgeräten relativ einfachen Handhabung und Bedienbarkeit der Gammaradiographiegeräte. Ein Umstieg auf alternative Prüftechnologien, insbesondere von Durchstrahlungsprüfungen auf Ultraschallprüfungen⁶³, ist für die Prüffirmen nur durch einen erhöhten Zeit- und Kostenaufwand in der Personalausbildung bzw. in der Personalauswahl realisierbar.

Bei gemeinsamer Betrachtung der technischen und personellen Bedingungen im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung kommen wir zu dem Schluss, dass eine Ablösung von HRQ eher mittelfristig möglich ist.

⁶³ Um eigenständig Durchstrahlungsprüfungen (Röntgen- oder Isotopentechnik) durchführen zu können benötigen die Mitarbeiter ein RT-Zertifikat nach DIN EN ISO 9712 [36]. Für die Anwendung von Ultraschalltechniken ist ein UT-Zertifikat nach dieser Norm notwendig. Je Zertifikat können dazu bis zu 160 Stunden theoretische Schulungszeit und bis zu 30 Monate praktische Erfahrungszeit nötig sein.

6.5. Brachytherapie

Ähnlich wie im Bereich der Teletherapie (vgl. Abschnitt 6.2) ist auch in der Brachytherapie für die Anwender weniger die mögliche Vermeidung von HRQ als vielmehr die medizinische Effektivität sowie die Zuweiser-, die Kosten- und die Abrechnungsstruktur entscheidend. Zudem sind Faktoren wie die Zugänglichkeit zum zu bestrahlenden Gewebe und der Zustand des Patienten für die Behandlung wichtig. Die für den Patienten beste Wahl einer Therapie ist Gegenstand der laufenden medizinischen Forschung und kann daher nicht im Rahmen eines Technologievergleichs erfolgen.

Um dennoch einen Vergleich der in Tabelle 5 dargestellten Alternativtechnologien vorzunehmen, betrachten wir die medizinische Effektivität aus der physikalisch-technischen Sicht. Danach ist die HDR-Brachytherapie mit Co-60-Quellen aufgrund der homogeneren Isotropie (siehe Abbildung 13) und der stetigen radialen Dosisfunktion (siehe Abbildung 14) leicht im Vorteil gegenüber der wesentlich weiter verbreiteten HDR-Brachytherapie mit Ir-192-Quellen [33]. Die Stetigkeit der radialen Dosisfunktion bewirkt ein besseres Verhältnis zwischen der im Zielvolumen applizierten Dosis und der möglichst niedrigen Dosis um umgebenden Gewebe. Die LDR-Brachytherapie und die e-Brachytherapie schätzen wir als ungefähr gleichwertig zur HDR-Brachytherapie mit Ir-192-Quellen ein. Die Teletherapieformen und die intraoperative Röntgentherapie sind aufgrund des größeren Abstands zwischen Strahlungsquelle und Zielvolumen vom physikalischen Prinzip her etwas im Nachteil.

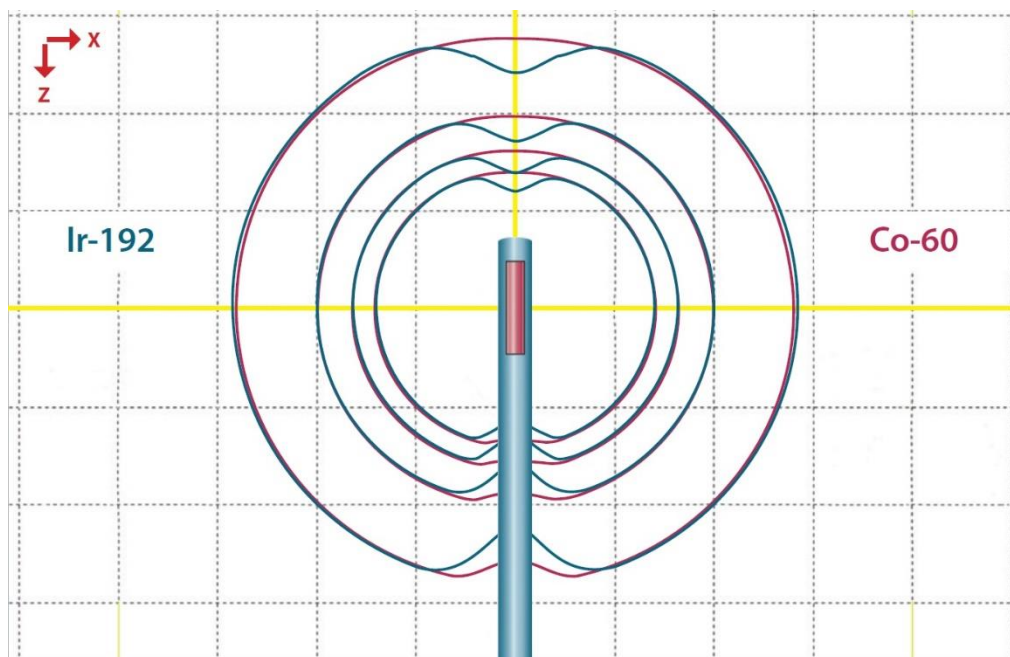


Abbildung 13: Isodosenkurven einer typischen zylinderförmigen Afterloadingquelle mit Ir-192 und Co-60 im relativen Vergleich (Darstellung mit freundlicher Genehmigung der Eckert & Ziegler BEBIG GmbH)

Neben dieser medizinischen Effektivität ist allerdings auch die Minimierung der Behandlungsdauer entscheidend für den Therapieerfolg. Die Behandlungsdauer ist nicht nur ein wichtiges ökonomisches Kriterium für die Anwender, sondern auch ein nicht zu vernachlässigender Faktor für das Wohl des Patienten. Zudem gilt, je kürzer die Behandlungsdauer desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Zielgenauigkeit bei der Bestrahlung durch Patienten- oder Organbewegungen leidet. Bei der Behandlungsdauer sind die Teletherapieformen im Vorteil und die LDR-Brachytherapie sowie die IORT aufgrund des zusätzlich notwendigen chirurgischen Eingriffs im Nachteil.

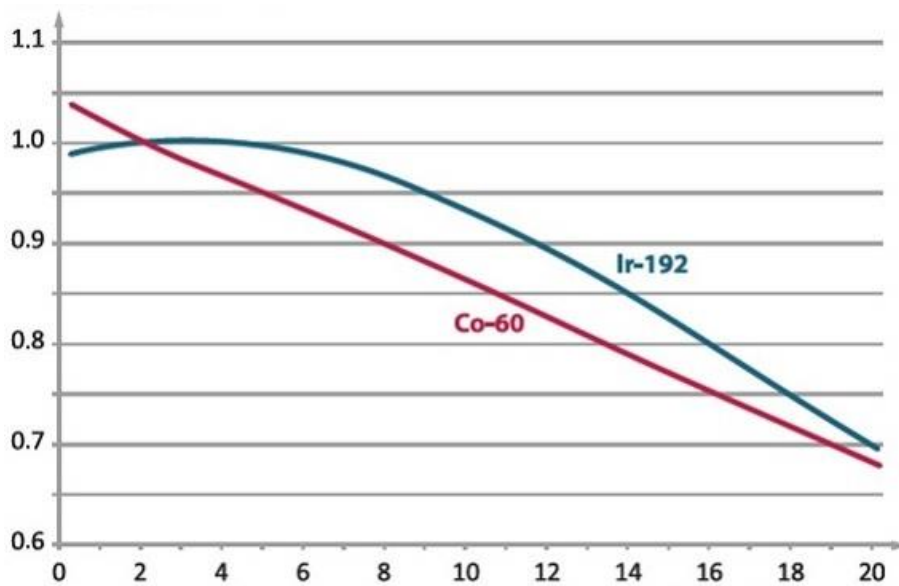


Abbildung 14: Relative radiale Dosisverteilung von Co-60 und Ir-192 im Gewebe bis 20 cm
(Darstellung mit freundlicher Genehmigung der Eckert & Ziegler BEBIG GmbH)

Die unterschiedlichen einmaligen und laufenden Kosten wurden bereits im Abschnitt 5.5 erläutert und können im Einzelfall vom Entscheider unterschiedlich gewichtet werden, da Baukosten, Anschaffungskosten und laufende Kosten häufig aus unterschiedlichen Töpfen finanziert werden. In der umfassenden Tabelle im Abschnitt 4 der Anlage zu diesem Bericht haben wir dennoch versucht, auf Basis von Anwenderbefragungen die finanziellen Kriterien für die einzelnen Technologien zu bewerten.

Die Sicherheit bzw. der Strahlenschutz des Personals ist abhängig von der Strahlenexposition im Routinebetrieb. Bei vollständig abschaltbaren Teletherapiegeräten ist die Strahlenexposition des Personals nahe Null. Bei der Verwendung von Seeds oder Applikatoren in der LDR-Brachytherapie ist ein verhältnismäßig enger Kontakt zu den radioaktiven Stoffen und damit eine gewisse Strahlenexposition nicht zu vermeiden. Ebenso ist es bei den intraoperativen Techniken, bei denen erfahrungsgemäß die höchsten Expositionen auftreten.

Votum und Prognose

Wie oben bereits beschrieben hängt die Eignung der Alternativtechnologien zu einem wesentlichen Teil von der sich kontinuierlich ändernden medizinischen Lehrmeinung ab. Trotzdem sehen wir aus physikalisch-technischer Sicht die HDR-Brachytherapie mit Co-60-Quellen als vielversprechendste Alternative zur HDR-Brachytherapie mit Ir-192-Quellen an, die kurzfristig verfügbar ist. Aufgrund der Ähnlichkeit der Therapieform – es handelt sich nur um den Wechsel von einem kurzlebigen zu einem langlebigeren Nuklid – kann dies nicht überraschen. Der Gewinn bei einem derartigen Wechsel liegt allerdings nicht in der Vermeidung von HRQ, sondern in der Vermeidung von Quellenwechsell und -transporten wodurch immerhin das Risiko eines Diebstahls verringert wird.

Von den übrigen Alternativtechnologien erscheint die LDR-Brachytherapie und die e-Brachytherapie prinzipiell noch am ehesten kurzfristig als Alternative denkbar. Bei der IORT und der Röntgen-Teletherapie ist eine seriöse Prognose zum Zeithorizont nicht möglich, da diese Techniken aufgrund der zum Teil schlechteren Zugänglichkeit zum Zielvolumen jeweils für sich genommen keine umfassende Alternative zur Brachytherapie mit HRQ darstellen. Gleichwohl ist es denkbar, dass eine Kombination aus allen HRQ-freien Alternativtechnologien die Verwendung von HRQ in der Brachytherapie mittelfristig ersetzen kann.

6.6. Kleinkammerbestrahlung

Für Kleinkammerbestrahlungsanlagen mit HRQ sind Röntgenanlagen und Beschleunigeranlagen die prinzipiellen Alternativen. Als vollständiger Ersatz für Cs-137-Anlagen kommen Beschleunigeranlagen jedoch aufgrund der wesentlich höheren Kosten und der höheren Ausfallzeiten – wie bereits im Abschnitt 5.6.1 erläutert – weniger in Betracht. Wir fokussieren uns daher im Folgenden auf Röntgenanlagen als Alternativtechnologie.

6.6.1. Bestrahlung von Blutprodukten

Röntgenanlagen sind im Hinblick auf die essentiellen Bewertungskriterien „Dosishomogenität“ und „Ausfallzeiten“ fast gleichwertig zu Cs-137-Anlagen. Allerdings unterliegen Röntgenanlagen aufgrund ihrer technisch anspruchsvolleren Komponenten (Röntgenröhre, Hochspannungsgenerator und Kühlung) einem höheren Verschleiß. Bei Geräteausfällen ist zudem mit Stillstandzeiten von mehreren Tagen zu rechnen, da Ersatzteile und Servicetechniker häufig aus dem Ausland kommen. Zum einen leidet dadurch erheblich die Verfügbarkeit der Anlagen bzw. die Minimierung von Ausfallzeiten. Zum anderen sind deswegen die laufenden Kosten für die Röntgenanlagen höher.

Diese Nachteile sind jedoch der Tatsache geschuldet, dass in Deutschland bislang kaum Röntgenanlagen zur Blutbestrahlung verwendet werden.

Votum und Prognose

Bei einem flächendeckenden Einsatz von Röntgen-Blutbestrahlungsanlagen würden sowohl die Kosten für den laufenden Betrieb als auch die Ausfallzeiten spürbar sinken. Daher halten wir trotz der zurzeit noch nicht vollkommenen Gleichwertigkeit beider Technologien bzgl. der vorgenannten Aspekte einen kurzfristigen Ersatz der HRQ in diesem Bereich für technisch und wirtschaftlich machbar.

Den realen Zeithorizont für einen vollständigen Austausch von Anlagen mit HRQ durch Röntgenanlagen schätzen wir jedoch als mittelfristig (im Bereich von bis zu 10 Jahren) ein. Denn die zurzeit vorhandenen Cs-137-Anlagen werden durch ihren geringen Verschleiß und ihre lange Lebensdauer routinemäßig nur selten vom Betreiber ausgetauscht. Ein Förderprogramm wie das im Abschnitt 5.6.1 bereits erwähnte CIRP könnte allerdings helfen, diesen Zeithorizont zu verkürzen.

6.6.2. Bestrahlung von Forschungsgegenständen

In diesem Anwendungsbereich sind Röntgenanlagen bei fast allen Bewertungskriterien gleichwertig oder sogar besser als Cs-137-Anlagen. Die laufenden Kosten sind allerdings bei Röntgenanlagen wie bereits im Abschnitt 6.6.1 beschrieben durch den höheren Verschleiß und die schlechtere räumliche Abdeckung durch Servicetechniker höher als bei Cs-137-Anlagen.

Relevant für die Anwender ist jedoch das Kriterium der Vergleichbarkeit [29]. Widersprüchliche Studienergebnisse bei der vergleichenden Untersuchung von Dosis-Wirkungsbeziehungen im Mäusemodell einerseits mit Röntgen- und andererseits mit Cs-137-Anlagen erschweren die Akzeptanz durch die Forscher [30].

Votum und Prognose

Bei einem flächendeckenden Einsatz von Röntgenanlagen in diesem Anwendungsbereich und parallel im Bereich der Blutbestrahlungen würden die Kosten für den laufenden Betrieb deutlich sinken. Um die Akzeptanz durch die Forscher bzgl. der Vergleichbarkeit zu erhöhen, sind weitere gezielte Vergleichsstudien erforderlich. Wenn diese Studien Methoden ermitteln, um von der zellulären Ebene bis zum makroskopischen Mausmodell Dosis-Wirkungsbeziehungen von Röntgenstrahlung und Cs-137-Strahlung quantitativ zu vergleichen, dann ist ein Verzicht auf HRQ in diesem Anwendungsbereich langfristig denkbar.

6.7. Bohrlochuntersuchungen

Die Bestrebung, radioaktive Stoffe und speziell HRQ durch alternative Messmethoden bei der Untersuchung von Bohrlöchern, Kavernen und Gesteinsschichten zu ersetzen, ist schon seit Jahren in der Branche zu beobachten. Eine technisch ins Detail gehende Untersuchung ist die oben bereits erwähnte Studie aus dem Jahr 2010: *Evaluation of Non-Nuclear Techniques for Well Logging* [31]. Seitdem wurden allerdings folgende damals noch kritisch betrachtete Eigenschaften der alternativen Technologien durch technische Weiterentwicklungen verbessert.

Die Ausfallsicherheit der Neutronengeneratoren war so niedrig, dass oftmals zwei identische Tools bei einem Einsatz vor Ort vorgehalten werden mussten, um einen kurzfristigen Ausfall zu kompensieren. In den letzten Jahren ist die Ausfallquote der Generatoren jedoch deutlich optimiert worden, so dass in diesem Punkt der ursprüngliche Vorteil der HRQ-Technologie fast vollständig verschwunden ist.

Die Vergleichbarkeit zwischen früheren Messungen mit Am-241/Be-Quellen und neueren Messungen mit Neutronengeneratoren war in der Vergangenheit gemäß unseren Anwenderbefragungen oft unzureichend; Entwicklungen in der Rohdatenauswertung haben jedoch dazu geführt, dass mittlerweile bei einem Großteil der Messaufgaben ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

Die jüngste technologische Entwicklung im Bereich der Vermeidung von radioaktiven Stoffen betrifft die Dichtemessungen, die klassischerweise mit Cs-137-Quellen (mit Aktivitätswerten knapp unterhalb der HRQ-Grenze) durchgeführt werden. Die großen Firmen der Branche sind dabei, kompakte Röntgengeneratoren als Ersatzquellen zu entwickeln. Ein anderer Ansatz, der verfolgt wird, ist die Dichtemessung mittels Neutronenaktivierung über die Ermittlung der resultierenden Gammastrahlung unter Verwendung von Neutronengeneratoren. Beide Technologien befinden sich jedoch noch in der Entwicklung und sind als Alternative noch nicht verfügbar.

Einige der bereits 2010 festgestellten Nachteile der alternativen Technologien bestehen jedoch weiterhin [31]: die Anschaffungskosten sind nach wie vor wesentlich höher und die Verwendungsdauer ist deutlich geringer als die oftmals über Jahrzehnte fast wartungsfrei betriebenen Am-241/Be-Quellen. Beide Aspekte liefern somit einen betriebswirtschaftlichen Anreiz, die meist schon lange in Gebrauch befindlichen Quellen weiterhin zu verwenden.

Eine pauschale Bewertung und ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Technologien ist kaum möglich, da sich die konkreten Anwendungsbedingungen im Einzelfall sehr stark voneinander unterscheiden können: die Art des Gesteins, die benötigte vertikale Ortsauflösung der Messung, die benötigte horizontale Messwertinformation sowie die Frage, ob während des Bohrens⁶⁴ oder in einem bereits vorhandenen Bohrloch nachträglich⁶⁵ gemessen wird. Zudem muss beachtet werden, dass viele Messaufgaben nur durch eine Kombination der Nutzung verschiedener Technologien bewältigt werden können.

Votum und Prognose

Nach unseren Recherchen und Befragungen können die oben genannten Alternativtechnologien nur in Kombination die Verwendung von HRQ in den nächsten 10 Jahren vollständig ersetzen. Geeignete Anreize wären neben der finanziellen Förderung des Verzichts auf HRQ die Unterstützung bei der Forschung und Entwicklung von miniaturisierten Röntgenanlagen und von Algorithmen zur Umrechnung der unterschiedlich gesammelten Rohdaten untereinander.

⁶⁴ logging while drilling, LWD (Messgeräte innerhalb des Bohrgestänges)

⁶⁵ wireline logging (kabelgebundenes Messen)

7. Fazit

Die Verwendung von hochradioaktiven Strahlenquellen wird in Deutschland noch lange andauern. Ein differenzierter Blick auf die zahlreichen Anwendungsbereiche offenbart jedoch das Potential, einen Teil der HRQ durch alternative Technologien zu ersetzen. Bei der Bewertung der Alternativen müssen je Anwendungsgebiet unterschiedliche Bewertungskriterien betrachtet werden, die wiederum verschiedene Gewichtungen haben.

Eine zusammenfassende Darstellung dieser Bewertung ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Bewertungen resultieren aus Umfragen unter Anwendern von HRQ. Zusammen mit den Erläuterungen im Kap. 6 ergibt sich damit ein anwendungsorientierter Einblick in die Motivation und Bedürfnisse der Anwender, die entscheidend dafür sind, wie eine erfolgreiche Strategie zur Vermeidung von HRQ aussehen kann. Insbesondere wird dadurch deutlich, welche Anreize erfolgversprechend sein können.

Anwendungsbereich	Alternativtechnologie	Machbarkeit	Zeithorizont
Großkammerbestrahlung (Sterilisation)	Gassterilisation (mit EO)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	Beschleunigeranlagen (Elektronen)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	Beschleunigeranlagen (Photonen)	ggf. machbar	> 10 Jahre
Teletherapie	Protonenbeschleuniger	ggf. machbar	> 10 Jahre
	Elektronenbeschleuniger	machbar	< 5 Jahre
Prozessüberwachung (Füllstandsmessung)	Schwimmer	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Radar/Mikrowellenrückstreuung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Induktive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Kapazitive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Hydrostatische Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
Prozessüberwachung (Flächengewichtsmessung)	Röntgenanlagen	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Laserrückstreuung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Induktive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Kapazitive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
Gammadiagnostik	Röntgenanlagen	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Beschleuniger	nicht machbar	nicht abschätzbar
	aktive Thermographie	nicht machbar	nicht abschätzbar
	klass. Ultraschall	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Phased-Array Ultraschall	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	TOFD Ultraschall	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	EMAT (elektromagn. Ultraschall)	nicht machbar	nicht abschätzbar
Brachytherapie	LDR-Brachytherapie	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	IORT (Röntgen/Beschleuniger)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	e-Brachytherapie	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Teletherapie (Beschleuniger)	nicht machbar	> 10 Jahre
	Teletherapie (Röntgen)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	Co-60-HDR-Brachytherapie	machbar	< 5 Jahre
Kleinkammerbestrahlung (Blutprodukte)	Röntgenanlagen	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Beschleuniger	nicht machbar	nicht abschätzbar
Kleinkammerbestrahlung (Forschungsgegenstände)	Röntgenanlagen	ggf. machbar	> 10 Jahre
	Beschleuniger	nicht machbar	nicht abschätzbar
Bohrlochmessungen	Neutronengenerator	machbar	< 5 Jahre
	NMR	nicht machbar	> 10 Jahre
	Ultraschall	nicht machbar	> 10 Jahre
	EM	nicht machbar	> 10 Jahre

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung*, 2017.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung*, 2018.
- [3] Europäische Union, *Richtlinie 2013/59/EURATOM zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung*, 2013.
- [4] IAEA, *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, 2014.
- [5] United States Nuclear Regulatory Commission, *Title 10 of the Code of Federal Regulations*.
- [6] IAEA, *Categorization of Radioactive Sources*, 2005.
- [7] IAEA, *Dangerous quantities of radioactive material (D-values)*, 2006.
- [8] IAEA, *Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources*, 2004.
- [9] IAEA, *Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety*, 2016.
- [10] Europäische Union, *Richtlinie 2003/122/EURATOM zur Kontrolle hoch radioaktiver umschlossener Strahlenquellen und herrenloser Strahlenquellen*, 2003.
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Gesetz zur Kontrolle hochradioaktiver Strahlenquellen*, 2005.
- [12] Europäische Union, *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)*, 2017.
- [13] DIN 820-12, *Normungsarbeit - Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen*, 2014.
- [14] IAEA, *Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety*, 2018.
- [15] IAEA, *Organization, Management and Staffing of the Regulatory Body for Safety*, 2018.
- [16] IAEA, *Guidance on the management of disused radioactive sources*, 2018.
- [17] Nuclear and Radiation Studies Board, *Radiation Source - Use and Replacement*, USA: National Academies Press, 2008.
- [18] Matthias Spieß, Thorsten Schmidbauer, „Professionalität entscheidet: Management eines Störfalls aus Sicht des Betreibers,“ *Strahlenschutzpraxis*, 2018.

- [19] F. Röthemeyer und F. Sommer, *Kautschuk Technologie, Werkstoffe - Verarbeitung - Produkte*, München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [20] IAEA, *Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products*, 2008.
- [21] GIPA, *A Comparison of Gamma, E-beam, X-ray and Ethylene Oxide Technologies for the Industrial Sterilization of Medical Devices and Healthcare Products*, 2017.
- [22] Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, *Medizinische und gesundheitsökonomische Bewertung der Radiochirurgie zur Behandlung von Hirnmetastasen*, Köln, 2009.
- [23] S. Mathis-Edenhofer und W. Eisner, *Gamma Knife und stereotaktisch eingesetzte ("stereotaktische") Linearbeschleuniger: Zwei Applikationsformen von Radiochirurgie im Vergleich*, Wien: Ludwig Boltzmann Institut, 2010.
- [24] C. Chargari, E. Deutsch, P. Blanchard, S. Gouy, H. Martelli, F. Guérin, I. Dumas, A. Bossi, P. Morice, A. Viswanathan und C. Haie-Meder, *Brachytherapy: An Overview for Clinicians*, 2019, pp. 386-401.
- [25] P. Ramachandran, *New era of electronic brachytherapy*, World Journal of Radiology, 2017.
- [26] Bundesärztekammer, *Richtlinie zur Gewinnung von Blut und Blutbestandteilen und zur Anwendung von Blutprodukten*, 2017.
- [27] E. Bakken, K. Cary, A. Derrick, E. Hildebrand, K. Schroeckenthaler und M. Taalbi, *Cost-Benefit Analysis of Switching from Cesium-Chloride to X-ray Blood Irradiators*, 2013.
- [28] M. Pomper, E. Murauskaite und T. Coppen, *Promoting Alternatives to High-Risk Radiological Sources: The Case of Cesium Chloride in Blood Irradiation*, Washington, 2014.
- [29] B. Gibson, N. Boles, G. Souroullas, A. Herron, J. Fraley, R. Schwiebert, J. Sharp und M. Goodell, *Comparison of Cesium-137 and X-ray Irradiators by Using Bone Marrow Transplant Reconstitution in C57BL/6J Mice*, Bd. 65, Comp. Med, 2015, pp. 165-172.
- [30] J. Tollefson, *Biologists struggle with push to end use of caesium*, Bd. 533, Nature, 2016.
- [31] U.S. Department of Energy, *Evaluation of Non-Nuclear Techniques for Well Logging: Technology Evaluation*, 2010.
- [32] Europäische Union, *Verordnung 2017/745 des europäischen Parlaments und des Rates über Medizinprodukte (MDR)*, 2017.
- [33] S. Strohmaier und G. Zwierzchowski, *Comparison of Co-60 and Ir-192 sources in HDR brachytherapy*, Journal of Contemporary Brachytherapy, 2011.
- [34] G. M. Moore, *Radiological Weapons: How Great Is The Danger?*, Lawrence Livermore National Laboratory, 2003.
- [35] Strahlenschutzkommission, Band 56, *Abschätzung, Bewertung und Management von Risiken*, 2005.

[36] DIN EN ISO 9712, *Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung*, 2012.

[37] DIN EN 17119, *Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Aktive Thermografie*, 2018.