



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn
<http://www.ssk.de>

**Bewertung der Auswirkungen einer Einführung
der ICRU95 Dosismessgrößen
auf den Strahlenschutz in Deutschland**
Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 343. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Juli 2026

Vorwort

Der Strahlenschutz schützt Mensch und Umwelt vor den schädlichen Wirkungen ionisierender und nichtionisierender Strahlung, ohne gerechtfertigte Anwendungen unangemessen einzuschränken. Die von der International Commission on Radiological Protection (ICRP) definierten Schutzgrößen, insbesondere effektive Dosis und Organ-Äquivalentdosis, beziehen sich auf Expositionen von Organen, Geweben oder den ganzen Körper durch ionisierende Strahlung und sind nicht direkt messbar. Daher werden in der praktischen Orts- und Personendosimetrie operationelle Messgrößen der International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) verwendet, die als messbare, meist konservative Ersatzgrößen der Überwachung dienen. Mit ICRU-Report 95 (ICRU 2020) wurden neue operationelle Messgrößen vorgeschlagen, die stärker auf anthropomorphen Referenzphantomen und Konversionskoeffizienten zur effektiven Dosis beruhen und diese in bestimmten Expositionssituationen besser approximieren sollen.

Eine Einführung der vorgeschlagenen neuen Messgrößen hätte weitreichende Auswirkungen auf die Strahlenschutzdosimetrie und den praktischen Strahlenschutz. Betroffen wären unter anderem die Kalibrierung und Bauartprüfung von Orts- und Personendosimetern, die Rückführbarkeit von Messungen, die Interpretation von Messwerten sowie die Anpassung nationaler und internationaler Regelwerke. Darüber hinaus müssten Messgeräte, Kalibrierfelder, Auswertalgorithmen, Dosimetrieprotokolle und bestehende Grenz- oder Referenzwerte auf Konsistenz mit dem neuen Größensystem überprüft und ggf. angepasst werden. Begleitend wären umfangreiche Informations- und Kommunikationsmaßnahmen nötig. Den mit dem Umstieg verbundenen Aufwand und die entsprechenden Kosten gilt es abzuschätzen und eine Kosten-Nutzen-Abwägung mit Blick auch auf die internationale Harmonisierung zu treffen. Das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) hat daher mit Schreiben vom 17. April 2025 der Strahlenschutzkommission (SSK) einen Beratungsauftrag zur Bewertung der Konsequenzen in wissenschaftlicher, praktischer, technischer und ökonomischer Hinsicht erteilt.

Zur Erarbeitung der vorliegenden Empfehlung richtete die SSK im Juni 2025 eine Arbeitsgruppe ein, der folgende Mitglieder angehörten:

- Dr. Jörn Stenger (Vorsitzender der Arbeitsgruppe)
- Dr. Markus Borowski
- Dipl.-Phys. Dominik Böhm
- Dr. Jörg Engelhardt
- Dr. Michael Iwatschenko-Borho
- M.A. Patrick Meschenmoser
- M.Sc. Johanna Pehlivan
- Dr. Holger Wolff

Unterstützt wurde die Arbeitsgruppe von Dr. Rolf Behrens.

Die SSK dankt dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) für die Bereitstellung umfangreicher Fachinformationen und fachlicher Unterstützung.

Bonn, im Juli 2026

Dr. Jörn Stenger

Vorsitzender der Arbeitsgruppe
„Wissenschaftliche Bewertung der
Auswirkungen der Einführung der
ICRU95 Dosismessgrößen auf die
Strahlenschutzpraxis in
Deutschland“

Prof. Dr. Björn Poppe

Vorsitzender des Ausschusses
„Strahlenschutztechnik“

Prof. Dr. Ursula Nestle

Vorsitzende der
Strahlenschutzkommission

INHALT

1	Einleitung und Beratungsauftrag	5
2	Empfehlung der SSK	6
3	Begründung.....	8
3.1	Berufliche Strahlenexposition und personendosimetrische Überwachung ...	8
3.2	Operationelle Messgrößen im Strahlenschutz: bestehendes System und Vorschläge nach ICRU-Report 95	9
3.2.1	Grundlegende Definitionen	9
3.2.2	Schutzgrößen und operationelle Messgrößen	9
3.2.3	Aktuell genutzte operationelle Messgrößen	11
3.2.4	Neue operationelle Messgrößen gemäß Vorschlag der ICRU.....	12
3.3	Bewertung des Nutzens der neuen Dosismessgrößen aus wissenschaftlicher Sicht.....	17
3.4	Auswirkungen auf den praktischen Strahlenschutz	19
3.5	Auswirkungen auf die Herstellung von Strahlenschutzdosimetern	23
3.5.1	Allgemeine Sicht.....	23
3.5.2	Technische Details zu passiven Dosimetern.....	25
3.5.3	Aspekte zu aktiven Ortsdosimetern	26
3.5.4	Weitere Dosimetertypen	28
3.5.5	Weitere Auswirkungen auf den Normungsbereich	29
3.6	Anpassung der Prüf- und Kalibrierbedingungen	29
3.7	Abschätzung der Beständigkeit der neuen operationellen Größen.....	29
3.8	Kommunikative Risiken und erfolgskritische Faktoren	30
3.8.1	Erfolgsfaktoren einer effektiven Veränderungskommunikation.....	31
3.8.2	Aspekte der Risikokommunikation	31
3.8.3	Kommunikative Auswirkungen nach Bezugsgruppen	32
3.8.4	Summarische Einschätzung zur Kommunikation	33
3.9	Mögliche Langzeitauswirkungen im Falle einer Nicht-Einführung.....	33
3.10	Fazit.....	34
	Literatur	35
	Abkürzungsverzeichnis	43
	Begriffserklärungen	44

1 Einleitung und Beratungsauftrag

Der Strahlenschutz hat die Aufgabe, Mensch und Umwelt vor den schädlichen Wirkungen ionisierender und nichtionisierender Strahlung zu schützen, ohne notwendige und gerechtfertigte Anwendungen unangemessen einzuschränken. Zum Zwecke des Schutzes vor ionisierender Strahlung wurden 1977 so genannte Schutzgrößen eingeführt. Diese Größen gehen auf Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection (ICRP) zurück und dienen der Bewertung der Strahlenexposition des Menschen auf Grundlage radiobiologischer und epidemiologischer Risikomodelle. Die effektive Dosis und die Organ-Äquivalentdosis beziehen sich auf Expositionen von Organen, Geweben oder des gesamten Körpers durch ionisierende Strahlung. Sie dienen der Bewertung der Strahlenexposition, der Abschätzung gesundheitlicher Risiken und der rechtlichen Festlegung von Grenzwerten und Schutzmaßnahmen, sind aber in der Praxis nicht direkt messbar.

In der praktischen Orts- und Personendosimetrie werden operationelle Messgrößen verwendet, die an definierten Punkten und in definierten Tiefen im Gewebeäquivalent festgelegt sind. Sie ermöglichen die Überwachung von Strahlenfeldern und individuellen Expositionen. Die operationellen Messgrößen werden durch Empfehlungen der International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) vorgeschlagen. Operationelle Messgrößen dienen als praktikable, im Allgemeinen konservative Ersatzgrößen für die oben genannten Schutzgrößen und werden zur Kontrolle der Einhaltung von Strahlenschutzanforderungen herangezogen.

Mit ICRU-Report 95 (ICRU 2020) wurden die operationellen Messgrößen für externe Expositionen stärker an die Schutzgrößen der ICRP angebunden. Während bisherige Größen wie die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ und die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ (für Kalibrierungen und Prüfungen) in vereinfachten Gewebephantomen definiert waren, beruhen die neu vorgeschlagenen Größen H^* und H_p auf Konversionskoeffizienten, die aus Berechnungen der effektiven Dosis in anthropomorphen Referenzphantomen abgeleitet sind. Dadurch sollen sie die effektive Dosis, insbesondere auch bei Energien, Strahlungsarten und Bestrahlungsgeometrien, bei denen dies bisher nicht gut gelang, besser approximieren.

Eine mögliche Einführung des vorgeschlagenen Systems bedarf einer Betrachtung der Vor- und Nachteile unter den spezifischen Randbedingungen in Deutschland. Die Betrachtung erfolgt dabei in Bezug auf die Ziele des Strahlenschutzes in wissenschaftlicher, technischer, praktischer und ökonomischer Hinsicht. Bewertet werden müssen vor allem die Auswirkungen auf die Strahlenschutzpraxis inklusive der Verfügbarkeit von Dosimetern. Ebenso müssen die Kosten einer Umstellung, mögliche Verbesserungspotenziale, die europäische und internationale Harmonisierung, die Kontinuität der Strahlenschutzregister und Dosisrückverfolgbarkeit sowie das allgemeine Vertrauen in den Strahlenschutz betrachtet werden.

Der Beratungsauftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) vom 17. April 2025 an die Strahlenschutzkommission hierzu gliedert sich in folgende Fragen:

- Wie ist der Nutzen der neuen Dosismessgrößen aus wissenschaftlicher Sicht zu bewerten?
- Welche Auswirkungen hat eine mögliche Einführung auf den praktischen Strahlenschutz und welchen Mehrwert bringen die neuen Größen im Vergleich zu den aktuell gesetzlich festgelegten Größen?

- Welche Auswirkungen hat eine mögliche Einführung auf die Dosimetrie und auf die Herstellung von Strahlenschutzdosimetern? Wie müssen Anforderungen an Dosimeter sowie deren Prüf- und Kalibrierbedingungen angepasst werden?
- Eine Implementierung in Deutschland würde voraussichtlich mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Wie beständig sind die neuen operationellen Größen auch über diesen Zeitraum hinaus? Inwieweit beeinflussen vergangene sowie erwartete Änderungen in der Berechnung der effektiven Dosis aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse diese Beständigkeit?
- Bei der Personendosimetrie wird nach Einführung der neuen Größen mit etwa 20 % niedrigeren Messwerten gerechnet. Wie können die veränderten Messwerte der Personendosimeter transparent und für die Allgemeinheit verständlich kommuniziert werden und welche weiteren Herausforderungen sind hinsichtlich der Kommunikation mit der Öffentlichkeit und beruflich strahlenexponierten Personen zu erwarten? Wie kann sichergestellt werden, dass es in der Folge nicht zu Lockerungen der Schutzmaßnahmen kommt?
- Mit welchen Langzeitauswirkungen ist im Falle einer Nicht-Einführung zu rechnen und wie sind diese zu bewerten?

Die vorliegende Empfehlung ist entlang dieser Fragen gegliedert.

2 Empfehlung der SSK

Die SSK bewertet den zu erwartenden Nutzen einer Einführung der vorgeschlagenen operationellen Messgrößen zum gegenwärtigen Zeitpunkt gegenüber dem zu erwartenden Aufwand und den damit verbundenen Kosten als nicht hinreichend für eine zeitnahe Einführung. Im Falle einer international abgestimmten Harmonisierung und Einführung zu einem späteren Zeitpunkt könnte eine erneute Bewertung ggf. anders ausfallen.

Nach heutigem Kenntnisstand lassen sich nur wenige relevante Vorteile für den praktischen Strahlenschutz erkennen. Gleichzeitig wären erhebliche Ressourcenaufwendungen zu erwarten. Die Geringfügigkeit der Vorteile basiert vor allem auf den Unsicherheiten in der praktischen Anwendung im heute verwendeten wie im vorgeschlagenen System, etwa durch Anwendungsfehler wie z. B. falsche Dosimetertrageweisen, unterschiedliche Kalibrier- und Bewertungsverfahren, den Aufenthalt von Personen in inhomogenen Strahlungsfeldern sowie auf möglichen Inkonsistenzen während einer Übergangszeit und daraus resultierender Anwendungsfehler (siehe Kapitel 3).

Daher empfiehlt die SSK:

- die neuen Messgrößen nach ICRU-Report 95 (ICRU 2020) aktuell nicht einzuführen,
- um auch zukünftig einen international möglichst einheitlichen Satz von Messgrößen in der Strahlenschutzdosimetrie zu verwenden, auf europäischer und internationaler Ebene auf eine Harmonisierung hinzuarbeiten. Diese Harmonisierung soll Rücksicht nehmen auf die Bedenken bei einer zeitnahen Einführung. Langfristig sind als Szenarien die Einführung sowie die Nichteinführung denkbar.

Die Empfehlungen beruhen auf folgenden Feststellungen, die in den weiteren Kapiteln entlang der Beantwortung der Fragen des Beratungsauftrages begründet werden:

- Die positiven Auswirkungen der vorgeschlagenen Messgrößendefinitionen auf den praktischen Strahlenschutz und auf die Erhaltung des Strahlenschutz-niveaus werden in den

meisten Aspekten als gering erachtet. Der praktische Strahlenschutz erfordert in Deutschland aktuell keine neuen Messgrößen (siehe Abschnitt 3.4).

- Die vorgeschlagenen Definitionen der Messgrößen erlauben eine Erweiterbarkeit zu höheren Teilchenenergien und anderen Teilchenarten. Für solche bisher eher selten vorkommenden Fälle sind jedoch bereits alternative Verfahren zur Dosisabschätzung etabliert worden (siehe Abschnitt 3.4).
- Die neuen operationellen Messgrößen können in bestimmten Expositionssituationen eine bessere Abschätzung der effektiven Dosis und der Augenlinsendosis ermöglichen. Dadurch könnten bisherige konservative Überschätzungen reduziert und grundsätzlich Spielräume für gezieltere, gegebenenfalls weniger restriktive Strahlenschutzmaßnahmen entstehen. Ein solcher Nutzen ist jedoch nur dann belastbar, wenn die verbesserte dosimetrische Abbildung im konkreten Anwendungsfall nicht durch andere Unsicherheiten in derselben Größenordnung überlagert wird. Dazu zählen insbesondere anatomische Abweichungen von den Referenz-Voxelphantomen, inhomogene Strahlungsfelder, Anwendungs- und Tragefehler von Dosimetern sowie Unsicherheiten der Expositionsgeometrie. Da diese Einflüsse im heutigen System teilweise durch konservative Annahmen abgedeckt werden, folgt aus der Einführung der neuen Messgrößen kein unmittelbarer oder allgemeiner Spielraum für Lockerungen. Gezielte Anpassungen von Strahlenschutzmaßnahmen sind auch innerhalb des bestehenden Systems möglich, wenn sie durch konkrete Expositionsanalysen begründet werden.
- Eine konzeptionell präzisere Abschätzung der Schutzgrößen könnte, bei Berücksichtigung der genannten interindividuellen anatomischen Unterschiede und Unsicherheiten in der Praxis, für medizinische und epidemiologische Interpretationen von Nutzen sein (siehe Abschnitt 3.2). Potenziell könnten allerdings auch Interpretationsunsicherheiten entstehen, wenn die Änderung der Messvorschriften nicht für epidemiologische Studien berücksichtigt wird.
- Ein relevanter Vorteil der neuen Messgrößen wäre in der besseren konzeptionellen Vergleichbarkeit der amtlichen Dosismesswerte mit den amtlichen Dosiswerten des fliegenden Personals zu sehen. Diese Dosiswerte werden schon jetzt nach einem vergleichbaren Konzept berechnet (siehe Abschnitt 3.4).
- Existierende Kalibrierungen und Energie- und Winkelabhängigkeiten von Dosimetern für Photonen, Elektronen und Neutronen für die bisherigen Messgrößen könnten grundsätzlich ohne weitere Messungen auf die neuen Messgrößen umgerechnet werden. Um bestehende Qualitätsanforderungen an Dosimeter auch für die neuen Messgrößen zu erfüllen, wären jedoch mindestens für Dosimeter zur Messung von Photonenstrahlung unterhalb ca. 70 keV technische Neuentwicklungen erforderlich. Dies betrifft z. B. geänderte Auswertelgorithmen oder technische Änderungen an den Dosimeterkonstruktionen und Detektoren (siehe Abschnitt 3.6).
- Aufgrund der Betrachtung von ausgedehnten Bereichen innerhalb des Körpers, statt fester Definitionstiefen von 10 mm, 3 mm bzw. 0,07 mm, würden sich die Messgrößen nicht mehr durch einfache Einzeldetektordosimeter messtechnisch umsetzen lassen.
- Es wären die Überarbeitung von Normen und Regeln für die Prüfung und Kalibrierung von Dosimetern sowie diverse Anpassungen regulatoriver und administrativer Dokumente erforderlich.
- Gemäß den Erfahrungen bei der Einführung der aktuell gültigen Messgrößen ist eine vieljährige Übergangsphase zu erwarten, in der verschiedene Staaten unterschiedliche Systeme

nutzen bzw. innerhalb einzelner Staaten alte und neue Messgrößen parallel verwendet werden. In dieser Phase ist die Vergleichbarkeit von Messwerten erschwert.

- Eine europäische und internationale Abstimmung über die Einführung der Messgrößen erscheint wesentlich, da eine nur in einigen Staaten erfolgende Einführung die Nachteile mangelnder Harmonisierung, Diskontinuitäten und Kosten mit sich brächte.
- Die im Bereich der ionisierenden Strahlung ohnehin anspruchsvolle Risikokommunikation wäre angesichts des komplexen Sachverhalts mit erheblichen Aufwendungen verbunden (siehe Abschnitt 3.8). Zunächst sind die neu vorgeschlagenen Größen konzeptionell näher an den Schutzgrößen, so dass eine Erklärung dieser Größen für Personen, die sich erstmals mit Strahlenschutzaspekten auseinandersetzen, einfacher erscheint. Erforderlich wäre jedoch eine konsistente Kommunikation zwischen allen beteiligten Gruppen wie etwa Fachgremien, Behörden, Messstellen, Dosimeterherstellern, Strahlenschutzverantwortlichen, Strahlenschutzbeauftragten, beruflich exponierten Personen, sowie gegebenenfalls der Öffentlichkeit. Besonders sensibel wären Anwendungsgebiete, in denen Dosiswerte unmittelbar mit persönlichem Risiko oder Schutzniveau verbunden werden, etwa die Personendosimetrie inklusive der Augenlinsendosimetrie, Notfall- und Einsatzsituationen, sowie öffentlich wahrgenommene Bereiche wie Umweltüberwachung oder Altlasten. Mangelndes Verständnis kann insbesondere entstehen, wenn sich Messwerte durch neue Messgrößen, Kalibrierungen oder Auswerteverfahren ändern, obwohl sich die reale Exposition nicht verändert hat. Grundsätzlich sind Grenzwerte im deutschen Strahlenschutzsystem sowohl für die Personendosimetrie als auch für die Ortsdosimetrie über die entsprechenden Schutzgrößen definiert. Der Strahlenschutz und das zugehörige Schutzniveau richten sich also an den Schutzgrößen aus. Im praktischen Strahlenschutz werden jedoch häufig die Messwerte der Messgrößen direkt für die Klassifizierung von Strahlungsbereichen und Expositionsszenarien verwendet. Da sich durch die Einführung der neu vorgeschlagenen Messgrößen die Konservativität zwischen Messgrößen und Schutzgrößen verringern würde, könnte diese Änderung als Absenkung oder Erhöhung des Schutzniveaus interpretiert werden und zu Vertrauensverlust gegenüber Messwerten, Grenzwerten oder behördlichen Bewertungen führen.

3 Begründung

3.1 Berufliche Strahlenexposition und personendosimetrische Überwachung

In der Strahlenschutzgesetzgebung sind zum Schutz des Menschen vor der schädigenden Wirkung ionisierender Strahlung verschiedene Grenzwerte festgelegt. Neben der allgemeinen Bevölkerung stehen besonders diejenigen Personen im Fokus, die aufgrund ihrer beruflichen Tätigkeit exponiert sind. Für diese beruflich exponierten Personen wurde die maximal zulässige effektive Dosis im Kalenderjahr auf 20 mSv festgelegt. Zugleich fordert § 8 (2) StrlSchG (StrlSchG 2017), jede Exposition auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie vertretbar möglich zu halten (Minimierungsgebot).

In Deutschland unterliegen alle Personen, die in ihrem Arbeitsumfeld ionisierender Strahlung ausgesetzt sind und festgelegte Dosiswerte im Kalenderjahr (z. B. 1 mSv effektive Dosis auf Grund der beruflichen Tätigkeit) überschreiten können, der Strahlenschutzüberwachung (SSK 2018, StrlSchG 2017). Dies betrifft Personen in geplanten Expositionssituationen (Medizin, Kerntechnik, allgemeine Industrie, Forschung und Lehre, fliegendes Personal), in bestehenden Expositionssituationen (Beschäftigte an Arbeitsplätzen mit erhöhter Exposition durch Radon oder radioaktive Altlasten) sowie in Notfallexpositionssituationen. Im Rahmen der Überwa-

chung werden Dosiswerte aller betroffenen Beschäftigten erhoben und im Strahlenschutzregister gespeichert und bilanziert.

Insgesamt kann für Arbeitsplätze im Zusammenhang mit geplanten Expositionssituationen festgestellt werden, dass die mittleren beruflichen Expositionen, verglichen mit der mittleren natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung (ca. 2,1 mSv pro Person und Jahr; BfS 2025), auf einem niedrigen Niveau liegen. Über die letzten Jahrzehnte hinweg konnte zudem ein tendenzieller Rückgang der Durchschnittswerte beobachtet werden, was für erfolgreiche Optimierungsmaßnahmen im Sinne des Minimierungsgebotes spricht.

Gemäß der Richtlinie 2013/59/EURATOM (Euratom 2014) ist eine amtliche personendosimetrische Überwachung erst ab einem möglichen Erreichen einer effektiven Jahresdosis von 6 mSv erforderlich. In Deutschland wurde die Schwelle auf 1 mSv gesetzt. Von den etwa 400 000 personendosimetrisch überwachten Personen haben weniger als 1 % der mithilfe von Dosimetern Überwachten eine registrierte Jahresdosis von 1 mSv oder mehr. Anders ist dies für Personen, die beruflich exponiert sind, deren Dosis aber mit Hilfe von Berechnungsverfahren ermittelt wird (z. B. fliegendes Personal). Hier werden die 1 mSv pro Jahr sehr häufig überschritten.¹

3.2 Operationelle Messgrößen im Strahlenschutz: bestehendes System und Vorschläge nach ICRU-Report 95

3.2.1 Grundlegende Definitionen

Vor der Wechselwirkung wird ionisierende Strahlung durch sogenannte Strahlungsfeldgrößen charakterisiert, wie etwa der Teilchen- oder Energiefluenz. Die Teilchenfluenz ist die Teilchenzahl, die ein Flächenelement durchsetzt, dividiert durch dessen Fläche; sie ist damit eine Größe des Strahlungsfeldes und nicht unmittelbar eine Dosisgröße, die bezüglich der Wechselwirkung der Strahlung betrachtet werden sollte. Für einfallende, austretende oder gestreute Strahlung können entsprechende Teilfluenzgrößen betrachtet werden. Ionisierende Strahlung wechselwirkt abhängig von Strahlungsart und Energie unterschiedlich mit Materie. Bei Photonen dominieren Photoeffekt, Compton-Streuung und Paarbildung, bei geladenen Teilchen Coulomb-Wechselwirkungen und bei Neutronen Streuung sowie Kernreaktionen. Die Bedeutung und Häufigkeit dieser Prozesse werden durch Wirkungsquerschnitte und Wechselwirkungskoeffizienten beschrieben. Dosimetrische Größen wie Kerma und Energiedosis bauen darauf auf, indem sie die Energieübertragung durch die ionisierende Strahlung in das Material bestimmen. Für die Bewertung biologischer Wirkungen im Strahlenschutz müssen darüber hinaus Strahlungsart, Expositionsbedingungen und die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit von Geweben berücksichtigt werden.

3.2.2 Schutzgrößen und operationelle Messgrößen

Für den praktischen Strahlenschutz werden Schutzgrößen und operationelle Messgrößen verwendet. Die Schutzgrößen betrachten ausgedehnte Geweberegionen (z. B. ganze Organe) bzw. den ganzen Körper, um ein Maß für das Risiko einer möglichen Schädigung zu erhalten und dieses Risiko durch Grenzwerte beschränken zu können. Diese Größen lassen sich jedoch im Allgemeinen nicht direkt messen, sondern nur basierend auf Messungen anderer Größen berechnen. Messgeräte lassen sich nicht direkt bezüglich dieser Schutzgrößen kalibrieren. Als

¹ Die Dosiswerte des fliegenden Personals werden abhängig von den Flugrouten berechnet. In (BfS 2025) werden 11 598 Personen mit einer Effektivdosis von 1 mSv bis 1,5 mSv ausgewiesen.

Messgrößen für die Berechnung, die auf kalibrierbaren Messgeräten bestimmt werden können, dienen die so genannten operationellen Messgrößen, die Schätzwerte für die Schutzgrößen liefern. Sie sind so definiert, dass sie mit physikalischen Detektorsystemen bestimmbar sind und als konservative Näherung für die im menschlichen Körper wirksame Dosis dienen. Damit stellen sie die Verbindung zwischen den physikalisch beschreibbaren Wechselwirkungsgrößen und der praktischen Dosisüberwachung her.

Die von der ICRP in ihrer Publikation 103 (ICRP 2007) definierten Schutzgrößen sind die effektive Dosis² (effektive Ganzkörperdosis) sowie die Organ-Äquivalentdosis der Augenlinse und die der lokalen Haut³. Diese Schutzgrößen sind nicht messbar.⁴

Die effektive Dosis ist die Summe der Organ-Äquivalentdosiswerte, die mit auf der Strahlenempfindlichkeit der jeweiligen Organe basierenden Wichtungsfaktoren (w_T) gewichtet sind. Eine Organ-Äquivalentdosis ist die Summe der Energiedosen in einem Gewebe, gewichtet mit strahlungsartabhängigen Wichtungsfaktoren (w_R) für die jeweiligen Strahlenarten (Photonen-, Elektronen-, Protonen-, Neutronen-, Ionen- und Alphateilchenstrahlung). Die Organ-Äquivalentdosis der Augenlinse und der lokalen Haut D sind jeweils das Produkt aus der mittleren **Energiedosis** $D_{T,R}$ in der Augenlinse bzw. der lokalen Haut und dem **Strahlungs-Wichtungsfaktor** w_R nach **ICRP**.

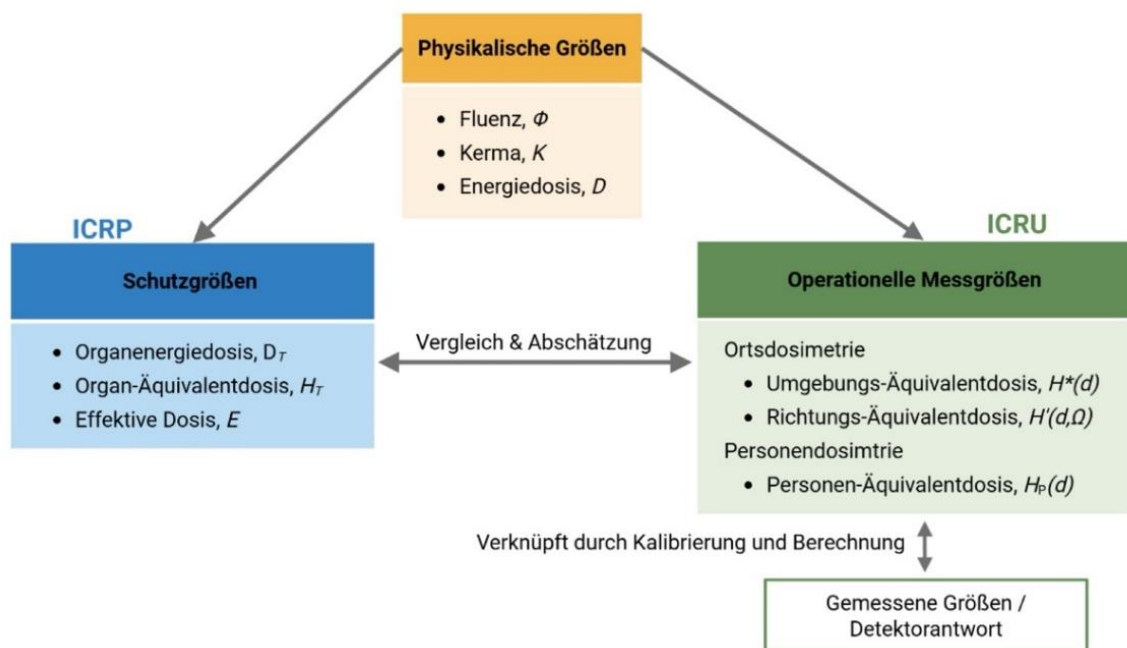


Abbildung 1: Übersicht Dosisgrößen im Strahlenschutz (siehe Erläuterungen zu den Zusammenhängen der Größen im Text) (übersetzt und modifiziert nach ICRU 2020)

Zur nicht-messtechnischen Bestimmung der Schutzgrößen werden basierend auf der Fluenz Simulationsrechnungen unter Verwendung gewebeäquivalenter virtueller Phantome (wie z. B. Voxelphantome) für die Personendosis benutzt. Für die Bestimmung der Organ-Äquivalentdosis der Augenlinse wird ein Augenlinsenmodell verwendet und für die lokale Hautdosis ein

² Gewichtet gemittelt über die Organe und Gewebe im gesamten Körper zur Abschätzung bzw. Limitierung des Krebsrisikos (stochastischer Effekt).

³ Im praktischen Strahlenschutz sind insbesondere die Äquivalentdosis der Augenlinse und die der Haut relevant, in Spezialfällen aber auch die der Hände, Unterarme, Füße und Knöchel.

⁴ Gemittelt über die gesamte Augenlinse bzw. über 1 cm² Haut zur Abschätzung bzw. Limitierung von Schäden wie Katarakt der Augenlinse oder Erythem der Haut oberhalb eines Schwellwertes (deterministischer Effekt).

gewebeäquivalenter Würfel. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der wirkenden Strahlungsfelder und Wechselwirkungen. Zusammensetzung und Abmessungen der zur Berechnung angenommenen Referenzpersonen sind durch die ICRP-Publikation 103 (ICRP 2007) festgelegt worden. Die entsprechenden Referenzphantome sind für die Erwachsenen in der ICRP-Publikation 110 (ICRP 2009) beschrieben worden und für die pädiatrischen Phantome in der ICRP-Publikation 143 (ICRP 2020a).

3.2.3 Aktuell genutzte operationelle Messgrößen

Die aktuell gültigen Messgrößen wurden in den 1980er Jahren entwickelt (ICRU-Reports 33, 51 und 57 (ICRU 1980, ICRU 1993, ICRU 1998)) und Anfang der 2000er Jahre in Deutschland eingeführt. Sie haben sich nach einigen Jahren Übergangszeit weithin etabliert und bewährt. Das gegenwärtige System nutzt vereinfachende Phantome wie Kugel, Quader, Stab oder Zylinder, um physikalische Basisgrößen über tabellierte Konversionskoeffizienten in operationelle Messgrößen zu überführen. Diese Koeffizienten werden für definierte Strahlungsarten, Energien und Einfallrichtungen berechnet. So werden beispielsweise Luftkerma bei Photonen, Fluenz bei Neutronen und Energiedosis bzw. Fluenz bei Elektronen in die Messgrößen der Ortsdosimetrie ($H^*(10)$, $H'(3;\Omega)$, $H'(0,07;\Omega)$) und der Personendosimetrie ($H_p(10)$, $H_p(3)$, $H_p(0,07)$) umgerechnet. Die Ortsdosis ist die an einem bestimmten Ort gemessene **Äquivalentdosis** H . Dabei wird zwischen der Dosis infolge durchdringender Strahlung, d. h. der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$, und der Dosis durch Strahlung mit geringer Eindringtiefe, d. h. der Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07)$, unterschieden. Die Personendosis ist die **Mess-Äquivalentdosis**, gemessen an der für die **Strahlenexposition** repräsentativen Stelle der Körperoberfläche. Die Tiefenangaben 10 mm, 3 mm und 0,07 mm stehen für die jeweilige Bezugstiefe im gewebeäquivalenten Phantom und repräsentieren Ganzkörper-, Augenlinsen- bzw. Hautexpositionen.

Die Äquivalentdosisgrößen, die als Schutzgrößen oder operationelle Messgrößen verwendet werden, mit der Einheit Sievert (Sv) entsprechen einer über den Strahlungswichtungsfaktor nach strahlenbiologischer Wirksamkeit gewichteten Energiedosis⁵. Bei der effektiven Dosis wird zusätzlich die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit einzelner Organe und Gewebe einbezogen.

Während die effektive Dosis vor allem stochastische Risiken beschreibt, werden Gewebereaktionen mit Schwellendosis über Organ- bzw. Gewebe-Äquivalentdosen und spezifische Grenzwerte, etwa für Augenlinse, Haut und Extremitäten, berücksichtigt.

Über entsprechende Grenzwerte werden Strahlenschutzmaßnahmen festgelegt (SSK 2018). Es werden im aktuell verwendeten System bewusst Vereinfachungen z. B. bezüglich der Phantome gemacht, um möglichst allgemeingültige Dosisgrößen zur Verfügung zu stellen. Zudem wählt man einen konservativen Ansatz, durch den die gemessenen Dosiswerte die realen Werte der Schutzgrößen tendenziell eher überschätzen als unterschätzen, damit das tatsächliche Strahlenrisiko auch bei sehr unterschiedlichen Randbedingungen nicht über dem geschätzten Risiko liegt. Damit trägt man zumindest teilweise den Abweichungen der menschlichen Anatomien vom Phantom und Unsicherheiten in der Anwendung von Dosimetern Rechnung. Diese Unsicherheiten sind gegeben z. B. durch das Tragen eines Dosimeters an verschiedenen Stellen des Körpers oder unter- bzw. oberhalb von (Schutz-)Kleidung, dem Aufenthalt in inhomogenen Strahlungsfeldern, der allgemein recht großen Unsicherheit der Dosismessung von einem Fak-

⁵ Die Energiedosis selbst wird in der Einheit Gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$) angegeben.

tor 1,5 (ICRP 1997)⁶ und größer, aber auch von Anwendungsfehlern wie einer falschen Orientierung der Dosimeter-Vorderseite.

3.2.4 Neue operationelle Messgrößen gemäß Vorschlag der ICRU

Im Jahr 2020 wurde von der ICRU ein neues System für die operationellen Messgrößen mit dem Ziel vorgeschlagen (ICRU 2020), die Schutzgrößen durch eine neue Definition der Messgrößen besser und einheitlicher abzubilden. Gründe für die Empfehlung der im ICRU-Report 95 (ICRU 2020) vorgestellten neuen Messgrößen waren der Wunsch nach einer präziseren Abbildung der Schutzgrößen, eine Erweiterung des aktuellen Definitionsbereichs zu höheren Energien und weiteren Strahlungsarten sowie eine konzeptionelle Harmonisierung und Vereinfachung.

Mit ihrer Einführung sollen unter anderem folgende Aspekte des aktuell verwendeten Systems verändert werden:

- **Unterschiedliche Phantome:** Die für die aktuellen Messgrößen verwendeten Phantome⁷ unterscheiden sich von den virtuellen Phantomen der Schutzgrößen, zudem sind sie unterschiedlich für die Orts- und Personendosimetrie. In der Ortsdosimetrie ist dies vor allem die so genannte ICRU-Kugel, in der Personendosimetrie z. B. Stab-, Zylinder- oder Quaderphantom.
- **Vereinfachte Geometrien:** Die aktuellen Definitionen der Messgrößen für Orts- und Personendosimetrie beziehen sich auf einzelne Punkte in stark vereinfachten Phantomen. Dies führt je nach Teilchenart und Energie zu Über- oder Unterschätzungen der effektiven Dosis.
- **Unterschiedliche Modellannahmen für Strahlenwirkung:** Der für die Messgröße verwendete Qualitätsfaktor $Q(L)$ und die für die Schutzgrößen verwendeten Strahlungs- und Gewebewichtungsfaktoren w_R und w_T beruhen auf unterschiedlichen Modellen und sind nicht direkt vergleichbar: $Q(L)$ basiert auf der unterschiedlichen biologischen Wirksamkeit hinsichtlich stochastischer Strahlenschäden, abhängig von dem linearen Energietransfer der ionisierenden Strahlung am jeweiligen Messpunkt. Der Faktor wird daher in drei Bereichen des linearen Energietransfers durch unterschiedliche mathematische Formulierungen beschrieben. Auch den Faktoren w_R und w_T liegen die unterschiedlichen biologischen Wirksamkeiten hinsichtlich der stochastischen Strahlenschäden zu Grunde. Im Unterschied zu $Q(L)$ erfolgt diese Bewertung jedoch nicht anhand des lokalen LET, sondern anhand einer Abschätzung einer mittleren relativen biologischen Wirksamkeit abhängig von der Strahlenart beziehungsweise bei Neutronen ihrer Energie. Die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T berücksichtigen neben der Eintrittswahrscheinlichkeit stochastischer Effekte in einem bestimmten Organ oder Gewebe auch Aspekte der Schadensschwere, insbesondere Letalität, Lebenszeitverlust und nicht-letale gesundheitliche Beeinträchtigungen. Die unterschiedliche Definition erschwert die Interpretation der Messergebnisse im Hinblick auf die biologische Wirkung.

⁶ Die Unsicherheit der eigentlichen Dosismessung mit heutigen Personendosimetern ist häufig geringer und kann auf maximal 30 % abgeschätzt werden (DIN IEC/TR 62461:2015-07)

⁷ Phantome für Messgrößen: Kugel für Ortsdosis sowie Quader, Säule, Zylinder und Stab für Rumpf, Extremität, Kopf und Finger. Phantome für Schutzgrößen: mathematisch/menschähnlich (Voxel, Auge, Haut).

- **Begrenzte Anwendbarkeit bei höheren Energien und anderen Strahlenarten:** Die aktuell verwendeten Messgrößen betrachten Photonen und Elektronen bis 10 MeV sowie Neutronen bis 200 MeV für $H^*(10)$ und 20 MeV für $H_p(10)$. Für höhere Energien und andere Strahlungsarten wie Protonen, Alpha-Teilchen oder weitere, z. B. für die Raumfahrt relevante Teilchen der kosmischen Strahlung, sind sie nicht definiert.

Im aktuellen System wird die effektive Dosis in verschiedenen Energiebereichen und für die unterschiedlichen Strahlenarten durch die bestimmten Messgrößen teilweise über- oder unterschätzt. Besonders gilt dies für Photonen im Energiebereich unter 70 keV, in dem die effektive Dosis durch die aktuellen Messgrößen um bis zu einem Faktor fünf überschätzt wird (in realen, zumeist energetisch recht breiten Strahlungsfeldern bis zu einem Faktor drei; siehe Abbildung 2).

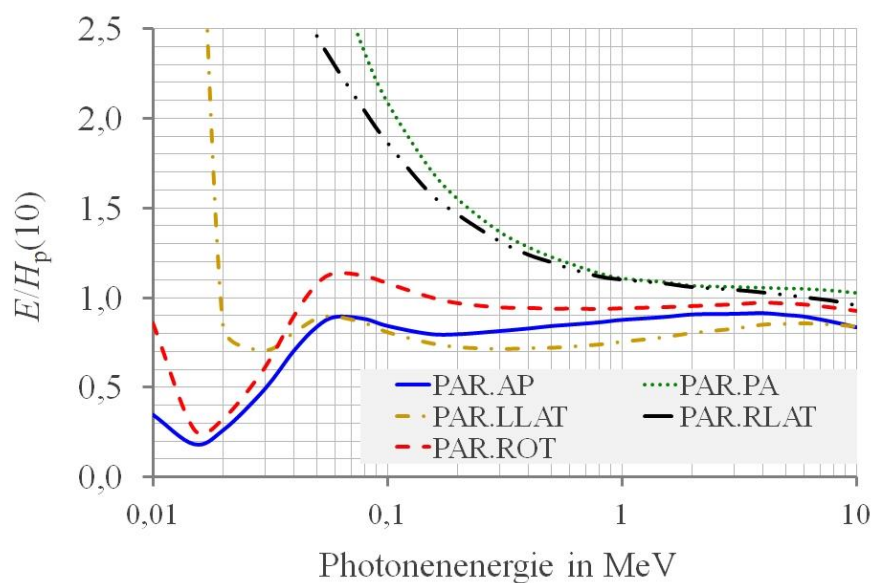


Abbildung 2: Verhältnis von effektiver Dosis E zu Tiefen-Personendosis $H_p(10)$, berechnet in einem anthropomorphen Phantom an der linken Brustseite, (Konversionsfaktor f_k / f_p) in Abhängigkeit von der Photonenenergie für die Bestrahlungsgeometrien PAR.AP (parallele Strahlengeometrie anterior-posterior), PAR.PA (posterior-anterior), PAR.LLAT (links-lateral), PAR.RLAT (rechts-lateral), PAR.ROT (rotationssymmetrisch) (ICRP 2010, Zankl 1999, SSK 2016).

Die ICRU schlägt nun die neuen Messgrößen H^* (Ortsdosis) und H_p (Personendosis) vor. Sie berechnen sich aus den Teilchenfluenzen ϕ am Messort und Konversionskoeffizienten h :

$$H = \phi \cdot h \quad (1)$$

(statt bisher $H = Q(L) \cdot D$ mit der Energiedosis D in Gewebe)

Dabei basieren die Konversionskoeffizienten auf denselben Phantomen, die auch zur Berechnung der Schutzgrößen verwendet werden. Die neuen Messgrößen sind somit konzeptionell sehr nah an den Schutzgrößen. Durch die Berücksichtigung des gesamten (Voxel-)Phantoms statt der festen Definitionstiefe von 10 mm bilden die vorgeschlagenen Messgrößen die Strahlenexposition im Sinne der Schutzgrößen präziser ab. Der neue Ansatz erlaubt prinzipiell eine einfachere Erweiterbarkeit hin zu höheren Energien und anderen Teilchenarten sowie gezieltere Strahlenschutzmaßnahmen aufgrund der präziseren Abschätzung der Dosis. Zudem

ist der konzeptionelle Ansatz ähnlich wie derjenige, der schon heute für die Bestimmung der Dosiswerte des fliegenden Personals verwendet wird.

Die neuen Messgrößen H^* und H_p sind (Ganzkörper-) Dosen, die radiobiologische Wichtungsfaktoren berücksichtigen.

Zur Abschätzung der Dosis der Augenlinse bzw. der lokalen Haut werden die Messgrößen $D'_{\text{Linse}}(\Omega)$ und $D'_{\text{lokale Haut}}(\Omega)$ (Ortsdosis) und $D_{p \text{ Linse}}$ und $D_{p \text{ lokale Haut}}$ (Personendosis) vorgeschlagen. Deren Berechnung erfolgt jeweils aus der Fluenz ϕ und einem entsprechenden Konversionskoeffizienten d (d'_{Linse} , $d'_{\text{lokale Haut}}$, $d_{p \text{ Linse}}$, $d_{p \text{ lokale Haut}}$):

$$D = \phi \cdot d \quad (2)$$

Im Gegensatz zu bisherigen Definitionen wird auch für diese Organe keine feste Tiefe mehr angenommen. Orts- und Personendosis unterscheiden sich bei diesen Größen nicht mehr in der Definition. D_{Linse} und $D_{\text{lokale Haut}}$ sind jedoch im Unterschied zum aktuell verwendeten System Energiedosen ohne radiobiologische Bewertung, für die die Einheit Gray (Gy) verwendet wird.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die aktuellen und vorgeschlagenen Strahlenschutzmessgrößen.

Tabelle 1 Gegenüberstellung der aktuellen und vorgeschlagenen Strahlenschutzmessgrößen (ICRU 1993, ICRU 1998, DIN 6814-3:2016-08, ICRU 2020)

	Aktuelle Messgrößen gemäß ICRU-Reports 51 und 57 bzw. DIN 6814-3	Vorgeschlagene Messgrößen gemäß ICRU-Report 95
Messgrößen der Ortsdosimetrie		
Ganzkörper	$H^*(10)$ Umgebungs-Äquivalentdosis	H^* Umgebungs-dosis
Augenlinse	$H'(3; \Omega)$ Richtungs-Äquivalentdosis in 3 mm Tiefe	$D'_{\text{Linse}}(\Omega)$ Richtungs-Energiedosis der Augenlinse
Haut	$H'(0,07; \Omega)$ Richtungs-Äquivalentdosis in 0,07 mm Tiefe	$D'_{\text{lokale Haut}}(\Omega)$ Richtungs-Energiedosis in lokaler Haut
Messgrößen der Personendosimetrie		
Ganzkörper	$H_p(10)$ Tiefen-Personendosis	H_p Personendosis
Augenlinse	$H_p(3)$ Augenlinsen-Personendosis	$D_{p \text{ Linse}}$ Personen-Energiedosis in der Augenlinse
Haut	$H_p(0,07)$ Oberflächen-Personendosis	$D_{p \text{ lokale Haut}}$ Personen-Energiedosis in lokaler Haut

In der Abbildung 3 wird beispielhaft für Photonenstrahlung dargestellt, wie sich die Konversionskoeffizienten von den physikalischen Dosiswerten (in diesem Fall als Gesamtluftkerma) in

die Messgrößen $h_{pK}(10) = H_p(10) / K_a$ bzw. neu $h_{pK} = H_p / K_a$ verändern, in dem das Verhältnis der Konversionskoeffizienten dargestellt wird.

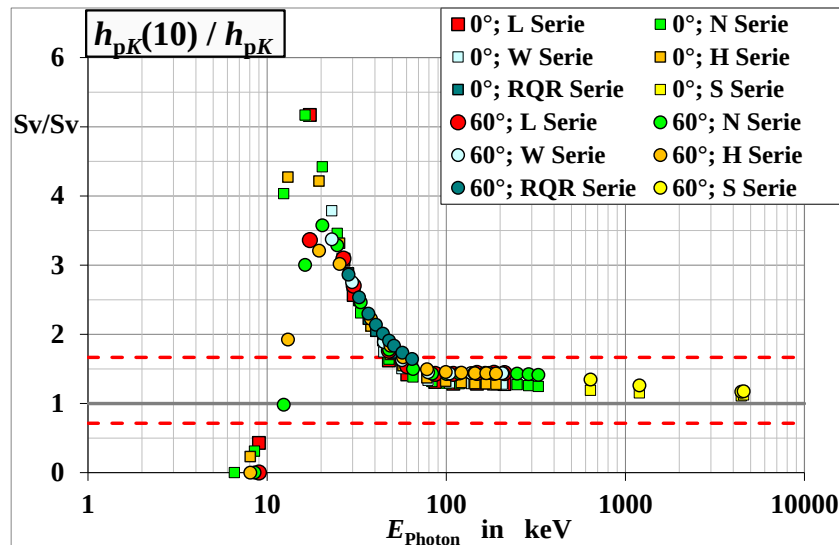


Abbildung 3: Verhältnis der Konversionskoeffizienten für die aktuellen Messgrößen und die neu vorgeschlagenen für die Personendosis (Behrens und Otto 2022) in Abhängigkeit der mittleren Photonenenergie von Röntgen-Strahlungsqualitäten (gemäß ISO 4037-1:2019-01) der Serien L: sehr stark gefiltert; N: stark gefiltert; W: mittel gefiltert; H: schwach gefiltert und gemäß (DIN EN 61267:2009-01) der Serie RQR diagnostischer Strahlungsqualitäten und für Strahleneinfallswinkel von 0° und 60° (Drehung des jeweiligen Phantoms um seine vertikale Achse).

Der Grund für diese Veränderung liegt darin, dass die aktuell verwendeten Messgrößen in einer festen Gewebetiefe von 10 mm definiert sind, während die inneren Organe tiefer im Menschen liegen und die niederenergetische Photonenstrahlung bis zum Organ bereits stärker geschwächt wurde. Die aktuellen Messgrößen überschätzen also für niedrige Photonenenergien die Organ-Äquivalentdosen erheblich. Dies wird mit dem neuen Konzept aus ICRU-Report 95 (ICRU 2020) vermieden. Das führt dazu, dass die Dosimeter für die Messung von H_p und H^* gemäß den neuen Definitionen bei niedrigen Photonenenergien unempfindlicher im Vergleich zu den bisherigen Messungen in $H_p(10)$ und $H^*(10)$ werden müssten und grundsätzlich dadurch bei einer identischen Exposition weniger anzeigen würden als Dosimeter für die aktuellen Messgrößen.⁸

Die Dosis der Augenlinse durch Betastrahlung würde durch die neuen Messgrößen deutlich präziser ermittelt als durch die entsprechenden aktuellen Messgrößen, welche die Schutzgröße um bis zu einem Faktor 5 über- bzw. unterschätzt (bedingt durch die aktuell feste Phantom-Definitionstiefe von 3 mm im Gegensatz zur Ausdehnung der Linse) (Abbildung 4).

⁸ Die niedrigen Photonenenergien treten insbesondere bei der mammographischen Bildgebung auf. In diesem Fall könnten sich größere Abweichungen zwischen den aktuellen und den neu vorgeschlagenen Messgrößen ergeben, die auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei eventuell betroffenen beruflich Strahlenexponierten durch Trageort und individueller Expositionssituation signifikant bleiben würden. Dieser Effekt ist jedoch bei der Bestimmung der Personendosis für beruflich Strahlenexponierte aufgrund der Strahlenfeldcharakteristika und der Strahlenschutzmaßnahmen im Allgemeinen zu vernachlässigen.

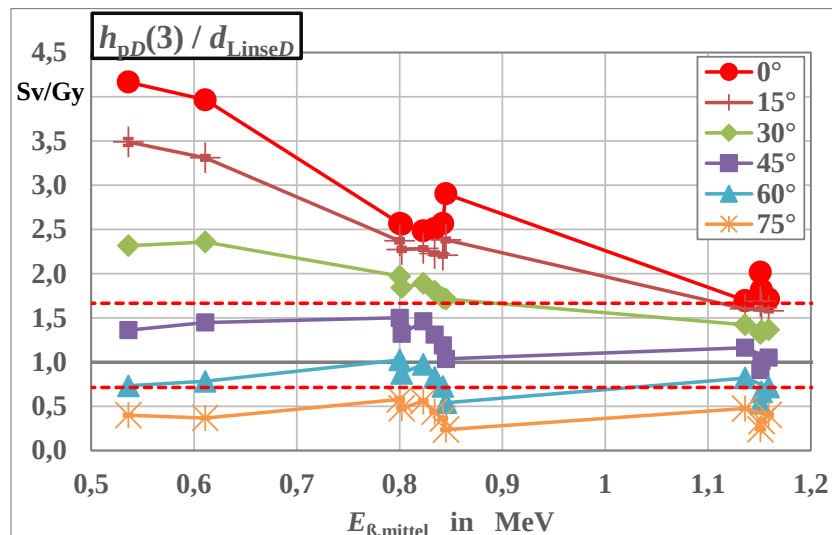


Abbildung 4: Verhältnis der Konversionskoeffizienten für die aktuell verwendete Messgröße zur Abschätzung der Augenlinsendosis $H_p(3)$ und der entsprechenden neu vorgeschlagenen Größe D_{Linse} , basierend auf der Dosis in der gesamten Linse (Behrens 2021) für Strahleneinfallswinkel von 0° bis 75° (Drehung des jeweiligen Phantoms um seine vertikale Achse).

Für die lokale Hautdosimetrie sind die Auswirkungen der neuen Größen voraussichtlich gering, da $H_p(0,07)$ und $D_{local\ skin}$ aufgrund ähnlicher Bezugstiefen und Berechnungsphantome numerisch nahe beieinander liegen. Bestehende $H_p(0,07)$ -Dosimeter dürften $D_{local\ skin}$ in vielen praktischen Situationen gut approximieren, so dass der Nutzen einer Umstellung im Bereich der Betastrahlung vor allem gegenüber dem Aufwand für Kalibrierung, Terminologie und Normung zu bewerten wäre (Bossin et al. 2024).

Neutronen unterscheiden sich von Photonen und Elektronen sowohl in Bezug auf die biologische Wirksamkeit als auch auf die energieabhängige Eindringtiefe in das Gewebe. Unter der Annahme, dass die neuen Messgrößen auf der Basis der vollständigen Voxelphantome und der biologischen Wirksamkeiten die effektive Dosis präziser abbilden, zeigt sich im Vergleich der Konversionskoeffizienten, dass im aktuellen System die Wirkung von Neutronenstrahlung bei thermischen Energien überschätzt und bei hohen Energien über 40 MeV zunehmend unterschätzt wird (Al Qaod et al. 2023). Es ergeben sich auch Unterschiede für verschiedene Einfallswinkel. Dies hängt mit der gegenwärtigen festen Phantom-Definitionstiefe von 10 mm zusammen, die bei Neutronen nur eingeschränkt geeignet ist (siehe Abbildung 5).

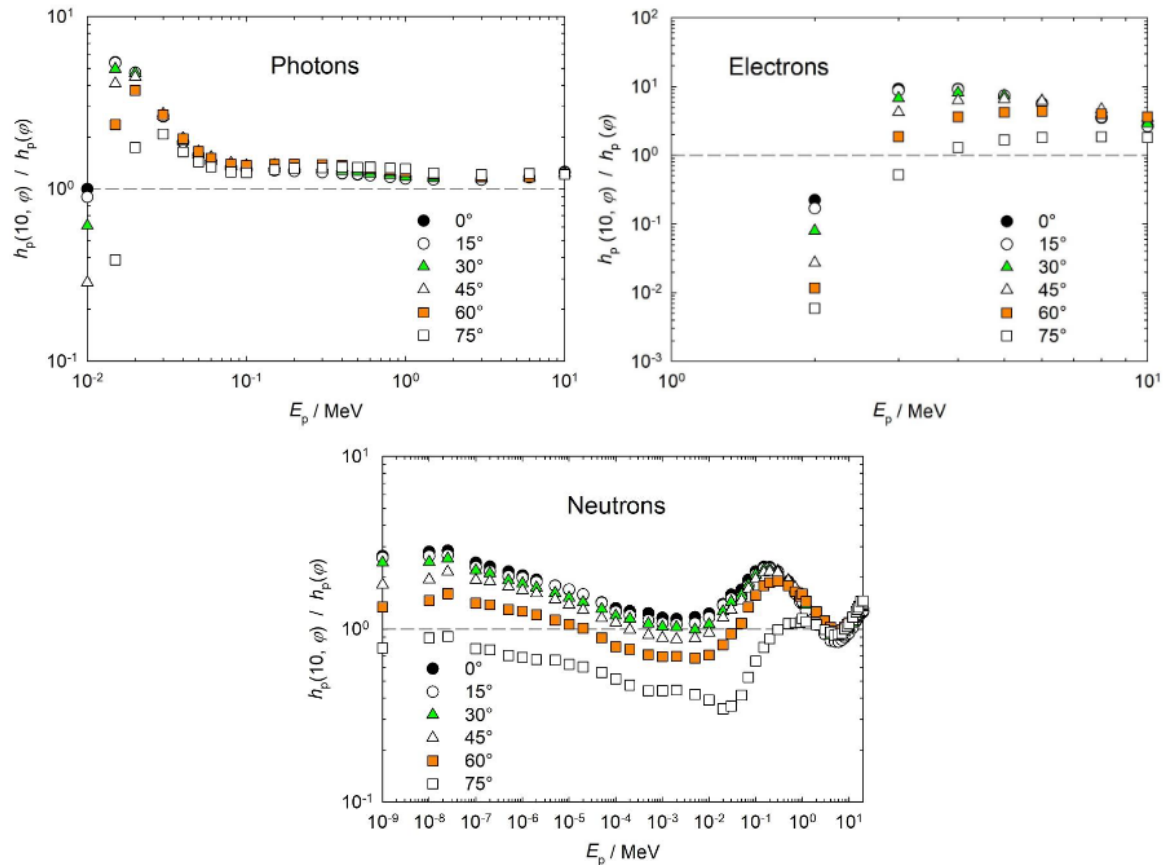


Abbildung 5: Verhältnis $H_p(10)$ zu H_p als eine Funktion von Energie und Einfallswinkel für Photonen, Elektronen und Neutronen (EURADOS 2022)

Basierend auf den vorgeschlagenen Definitionen der neuen Messgrößen müssen folgende Aspekte betrachtet werden:

- Es ist zu prüfen, ob und unter welchen Bedingungen die verbesserte konzeptionelle Übereinstimmung mit den Schutzgrößen auch zu einer verbesserten Genauigkeit praktisch erfasster Dosiswerte führt.
- Es ist zu prüfen, in welchem Umfang die erwarteten Potenziale, etwa für gezieltere Strahlenschutzmaßnahmen, eine formale Einführung der neuen Messgrößen voraussetzen oder ob vergleichbare Verbesserungen auch durch ergänzende Korrekturen und Hinweise innerhalb des bestehenden Systems erreichbar wären.
- Kommt es in der Praxis zu Situationen, in denen Maßnahmen zum Strahlenschutz nicht in einem sinnvollen Verhältnis zum tatsächlichen Risiko stehen? Und würden in diesen Situationen die neuen Messgrößen dieses Problem beheben?

3.3 Bewertung des Nutzens der neuen Dosismessgrößen aus wissenschaftlicher Sicht

Die vorgeschlagenen neuen Messgrößen berechnen sich wie oben beschrieben aus den Teilchenfluenzen am Messort und Konversionskoeffizienten, denen die gleichen virtuellen ausgedehnten Phantome zugrunde liegen wie für die Schutzgrößen. Dies ist die wesentliche Unterscheidung zu den aktuell in Deutschland geltenden Messgrößen, bei denen bestimmte, feste Definitionstiefen in einfachen Ersatzphantomen verwendet werden. Die gemessenen

neuen Orts- und Personendosen sind dadurch konzeptionell genauer bezüglich der Abschätzung der Schutzgrößen (und damit realere Schätzwerte der Schutzgrößen für Personen).

Unbenommen der primär praktischen Ziele des Strahlenschutzes lässt sich die umfangreiche Erfassung von Dosiswerten auch wissenschaftlich nutzen.

Wenn die oben beschriebene größere Genauigkeit in der Praxis umsetzbar wäre, ließe sich ein wissenschaftlicher Nutzen ableiten, weil die gemessenen Werte eine genauere Approximation der Schutzgrößen erlauben würden. Der Nutzen entstünde dort, wo statistische Analysen der dann genaueren Messwerte einer Vielzahl von Personen in unterschiedlichen Expositionssituationen relevant sind wie z. B. in epidemiologischen Untersuchungen.

Andererseits eignen sich die Dosisgrößen im Strahlenschutz u. a. durch die summarische Erfassung biologischer Wirkungsfaktoren über weite Energiebereiche nur eingeschränkt für detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen der ursächlichen Schädigungswirkung von ionisierender Strahlung. Hierfür wird bevorzugt die Energiedosis herangezogen und in ein Verhältnis zur zellbiologischen Wirkung oder zu gesundheitlichen Schäden gesetzt.

Weil die neuen Konversionskoeffizienten direkt mit den biologisch motivierten Wichtungsfaktoren und der Anatomie des Menschen zusammenhängen, ließen sich zukünftig die Ergebnisse von Dosismessungen, die gemäß den neu vorgeschlagenen Messgrößen erfolgen, besser interpretieren.

Da die epidemiologischen Grundlagen der Strahlenschutzbewertung bisher in einigen Fällen auf dem bisherigen Größensystem beruhen, würde eine Bewertung an Hand der neuen Messgrößen entweder neue Datenerhebungen oder umfangreiche retrospektive Rekonstruktionen früherer Expositionen mit den neuen Größen erfordern.

Auf Grund der nicht mehr benötigten Annahme eines Sekundärelektronengleichgewichts sind die vorgeschlagenen Messgrößen für deutlich größere Energiebereiche und darüber hinaus für weitere Teilchenarten als bisher anwendbar.⁹ Dies ist grundsätzlich als ein Vorteil im Sinne wissenschaftlicher Verwendbarkeit der Messgrößen zu werten.

Da in diesen Bereichen jedoch nur wenige Expositionssituationen mit ausreichend großen und homogenen Kollektiven vorliegen, ist nicht zu erwarten, dass allein durch die erweiterten Messmöglichkeiten kurzfristig statistisch belastbare neue Erkenntnisse für den Strahlenschutz gewonnen werden.

Die Verwendung der Energiedosis statt der Äquivalentdosis für die Messung der Dosis der Augenlinse und der lokalen Haut wäre vorteilhaft, da die zugehörigen Grenzwerte auf Gewebereaktionen abzielen. Dieser Wechsel ist positiv zu bewerten, da die ICRP für Gewebereaktionen bereits jetzt die Energiedosis bzw. die mit der relativen biologischen Empfindlichkeit (RBE) gewichtete Energiedosis empfiehlt (ICRP 2012) und ihre entsprechenden Schutzgrößen für die Augenlinse und die lokale Haut zukünftig voraussichtlich als Energiedosis definieren wird.

Würden also zukünftig entsprechende Dosimeter für die Augenlinsendosis entwickelt, ergäbe sich ein rein wissenschaftlicher Nutzen dadurch, dass eine präzisere Dosimetrie der Augenlinse genauere epidemiologische Studien zur Kataraktentstehung durch ionisierende Strahlung möglich machen könnte.

⁹ Ein Sekundärelektronengleichgewicht stellt sich bei zunehmender Photonen-Energie in größeren Materialtiefen ein (z. B. für Gamma-Strahlung aus dem ¹³⁷Cs-Zerfall mit 662 keV in 2 mm Plexiglastiefe, jedoch bei ca. 7 MeV erst in ca. 25 mm Plexiglastiefe).

Das neue Konzept eröffnet Perspektiven für eine stärker personalisierte Dosimetrie. Mit Hilfe entsprechend differenzierter Phantome ließen sich zukünftig, falls gewünscht, geschlechtsspezifische Unterschiede berücksichtigen, etwa durch eigene Konversionskoeffizienten für Frauen und Männer. Ebenso wäre es denkbar, für Schwangere angepasste Dosimeter oder Berechnungsmodelle zu entwickeln sowie altersbedingte Faktoren einzubeziehen. Als wissenschaftliche Fragestellungen können diese Ansätze von Interesse sein. Eine weitergehende Differenzierung ist nicht naheliegend, jedoch Gegenstand aktueller Forschung (ICRP 2023).

Die großen Streuungen der menschlichen Anatomien, die Unsicherheiten in der praktischen Dosiserfassung und Über- bzw. Unterschätzungen der Dosis aufgrund der vereinfachenden Phantome war bei Einführung der aktuellen Größen bekannt. Die Messgrößen $H_p(10)$ und $H^*(10)$ wurden entsprechend konservativ definiert (Alberts et al. 1994).

Studien mit individuellen Voxelphantomen zeigen, dass Organ- und Effektivdosen bei gleicher physikalischer Ausgangsgröße oder gleicher Referenzphantom-basierter Dosisabschätzung erheblich variieren können. Besonders ausgeprägt sind diese Unterschiede bei niedrigen Photonenenergien, oberflächennahen Organen und stark richtungsabhängigen Expositionen (Lee et al. 2024). Auch in der Röntgendiagnostik werden Unterschiede zwischen realen Patientinnen und Patienten und Standardphantomen als relevante Unsicherheitsquelle beschrieben, mit Abweichungen von bis zu ± 50 % für einzelne Organe und ± 20 % für die effektive Dosis (Kelaranta et al. 2016). Damit bleibt auch bei einer engeren Anbindung neuer operationeller Messgrößen an die Schutzgrößen eine relevante Unsicherheit durch individuelle Anatomie, Expositionsgeometrie und praktische Anwendung bestehen.

In der Summe rechtfertigt nach Einschätzung der SSK der wissenschaftliche Nutzen angesichts des Aufwands, der Unsicherheiten bei der Dosismessung im beruflichen Strahlenschutz und der zu erwartenden Diskontinuitäten die Einführung der vorgeschlagenen Messgrößen derzeit nicht. Zudem wird in wissenschaftlichen Studien der Epidemiologie die Energiedosis bevorzugt.

3.4 Auswirkungen auf den praktischen Strahlenschutz

Eine Vergleichbarkeit der personendosimetrischen Auswertungen innerhalb Deutschlands, aber auch mit europäischen Nachbarstaaten ist wesentlich, um unterschiedliche Schutzkonzepte vergleichen und darauf aufbauend Optimierungen vornehmen zu können. Es ist jedoch festzustellen, dass allein aufgrund der unterschiedlichen Konzepte zur personendosimetrischen Überwachung in der Praxis bereits jetzt kaum eine Vergleichbarkeit besteht. In Deutschland wird die Körperdosis an einer Stelle des Rumpfes hinter einer möglichen Strahlenschutzkleidung gemessen. In zahlreichen Ländern erfolgt die Messung oberhalb der Schutzkleidung, teilweise im Rahmen einer Doppeldosimetrie an zwei Stellen. Es ist unklar, wie die nicht von der Schutzkleidung bedeckten Körperabschnitte zu berücksichtigen sind, zumal es unterschiedliche Formen der Schutzkleidung gibt. Bei einer Messung oberhalb einer Schutzkleidung kehrt sich das Problem um, da hier die Schutzwirkung der Schutzkleidung in die Berechnung der effektiven Dosis einbezogen werden müsste. Die sich aus den unterschiedlichen Anwendungskonzepten ergebenden Ergebnisse sind daher nur schwer vergleichbar.

Allgemein scheint die Problematik einer Abschätzung der Körperdosis bei einer Punktmessung weiterhin nicht gut gelöst, vor allem wenn sich die überwachte Person in stark inhomogenen Feldern aufhält, wie sie z. B. im Bereich von radiologischen Interventionen in der Medizin oder bei der Handhabung von Radionukliden vorkommen. Darüber hinaus erfordert die Messung gepulster Strahlung spezielle Messtechnik. Die Einführung der neuen Messgrößen wird sich in dieser Hinsicht kaum auswirken: Die neuen Messgrößen schätzen die Körperdosis unter An-

nahmen zum Körperbau, insbesondere der Größe und dem Gewicht der Referenz-Voxelphantome, ab. Wie bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt, streuen die realen Körperproportionen jedoch signifikant und weichen mitunter systematisch von den in den Referenz-Voxelphantomen gemachten Annahmen ab.

Da die tatsächliche Organ- bzw. Körperdosis bei gleicher nomineller Exposition wesentlich von der individuellen Anatomie, insbesondere der Dicke des durchstrahlten Körpervolumens, Organlage und Gewebezusammensetzung abhängt, können sich Unterschiede zwischen Referenzphantomen und realen Personen substanziell auf die Dosisabschätzung auswirken. Dies wurde unter anderem für die Thoraxradiographie anhand patientendickenabhängiger Konversionskoeffizienten sowie für patientenspezifische Ganzkörpermodelle in der CT-Dosimetrie gezeigt (Cho 2017, Frenzel et al. 2014). Die genannten Studien stammen jedoch überwiegend aus der Patientendosimetrie und lassen sich daher nicht unmittelbar quantitativ auf berufliche Expositionen übertragen. Sie zeigen jedoch grundsätzlich, dass individuelle Anatomie, Körperdicke und Organlage die Beziehung zwischen einer nominellen Dosisgröße und der tatsächlichen Organ- bzw. Körperdosis beeinflussen können. In der beruflichen Strahlenschutzpraxis kommen weitere Einflussgrößen hinzu, insbesondere Dosimeterposition, Körperhaltung, Abschirmung, Expositionsgeometrie und inhomogene Strahlungsfelder. Damit belegen die Studien nicht konkrete Korrekturfaktoren für beruflich exponierte Personen, stützen aber die Einschätzung, dass die Einführung neuer Messgrößen individuelle und praktische Unsicherheiten nicht aufhebt.

Wie in Abschnitt 3.3 ausgeführt, ließe sich mit dem neu vorgestellten Konzept für die Ermittlung der operationellen Messgrößen im Prinzip eine Personalisierung der Personendosimetrie durchführen. Diese potenzielle Personalisierung der Dosismessung spielt für den praktischen Strahlenschutz keine entscheidende Rolle. Für schwangere Personen bestehen bereits klare, konservative Regelungen, Kinder und Jugendliche sind im beruflichen Strahlenschutz nicht relevant, mit der Ausnahme von minderjährigen Auszubildenden. Geschlechtsspezifische Unterschiede wären im Verhältnis zu den jeweils breiten anatomischen und physiologischen Streuungen unter Frauen und Männern zu bewerten. Im aktuellen System ist den anatomischen und physiologischen Streuungen und auch den Unsicherheiten in der Anwendung durch bewusst konservativ gewählte Konversionskoeffizienten und Grenzwerte Rechnung getragen, um alle überwachten Personen ausreichend zu schützen.

Das vorgeschlagene Konzept der Messgrößen ist im Prinzip konsistenter und präziser. Aufgrund der Unsicherheiten bei der praktischen Realisierung in unterschiedlichsten Expositionssituationen geht dieser Vorteil nach Einschätzung der SSK jedoch weitestgehend wieder verloren. Diese Unsicherheiten betreffen insbesondere die Übertragbarkeit von Referenzphantombasierten Konversionskoeffizienten auf individuelle Personen, die Repräsentativität der Dosimeterposition bei inhomogenen Strahlungsfeldern, die praktische Erfassung von Teilkörperexpositionen wie Augenlinse, Haut und Extremitäten sowie mögliche Anwendungs- und Tragefehler. Hinzu kommen Unsicherheiten durch unterschiedliche Strahlungsqualitäten, Energien und Einfallrichtungen, durch gemischte Strahlungsfelder. Dadurch ist nicht sichergestellt, dass die konzeptionell höhere Präzision der neuen Messgrößen in der betrieblichen Strahlenschutzpraxis tatsächlich zu einer entsprechend verbesserten Bewertung der Exposition führt.

Die neuen Messgrößen H_p und H^* würden zudem den bisherigen, konzeptionell konservativen Charakter der operationellen Messgrößen deutlich abschwächen, da sie der effektiven Dosis näherkommen. Das legt Potenziale zur Lockerung von Strahlenschutzmaßnahmen mit entsprechenden ökonomischen Vorteilen und potenziell erhöhter Akzeptanz der tatsächlich notwen-

digen Strahlenschutzmaßnahmen nahe, kann aber auch zur Verunsicherung und damit zu einem Vertrauensverlust beruflich strahlenexponierter Personen und der Bevölkerung führen.

Im praktischen Strahlenschutz spielen Photonen die größte Rolle, da sie insbesondere in der medizinischen Diagnostik und Therapie und vielen anderen Einsatzgebieten, wie etwa in der Materialprüfung, Lebensmittelbestrahlung und -durchleuchtung, Gepäckkontrolle, Prozesssteuerung, z. B. zur Dickenregulierung bei Walzvorgängen, zur Anwendung kommen. In der Umweltüberwachung und im radiologischen Notfallschutz sind sie die dominante Strahlenart. Daher ist von besonderem Gewicht, wie sich eine Einführung der neuen Messgrößen auf die Messung von Photonen auswirkt.

Elektronen spielen im praktischen Strahlenschutz überwiegend in Form von Betastrahlung bis zu einer Energie von einigen MeV eine Rolle, da höherenergetische Elektronen, wie z. B. von Beschleunigern, nur in Ausnahmefällen an Arbeitsplätzen auftreten. Bei Betastrahlern stehen die Messgrößen für die Augenlinse und die lokale Haut im Vordergrund, da Betastrahlung aufgrund ihrer relativ geringen Eindringtiefe in der Regel nicht signifikant zur effektiven Dosis beiträgt.

Bei Augenlinsen- und insbesondere Fingerringdosimetern bleibt die Repräsentativität der Messposition ein zentrales Problem. Dies gilt vor allem für die Nuklearmedizin, da die Exposition der Hände räumlich stark inhomogen sein kann und die maximale lokale Hautdosis häufig nicht an der Position des Strahlenschutzdosimeters auftritt. Die höchsten Dosen werden je nach Tätigkeit an Fingerkuppe, Zeigefinger oder Daumen beobachtet, während Fingerringdosimeter in der Routine meist an der Fingerbasis getragen werden. Dadurch kann die an der Fingerbasis gemessene Dosis die maximale lokale Hautdosis deutlich unterschätzen. Sans Merce et al. (2011) zeigen entsprechend, dass die Positionierung des Extremitätendosimeters entscheidend für eine korrekte Abschätzung der maximalen Hautdosis ist. Für die Nuklearmedizin wurden Verhältnisse zwischen Fingerkuppen- und Ringdosimeterposition im Bereich von etwa 1,4 bis 7 berichtet (Sans Merce et al. 2011, Kollaard et al. 2021). Für Routineüberwachungen wurde daher vorgeschlagen, das Fingerringdosimeter an der Basis des Zeigefingers der nicht-dominanten Hand mit dem Detektor zur Handinnenfläche zu tragen und den Messwert zur Abschätzung der maximalen lokalen Hautdosis mit einem Faktor von 6 zu multiplizieren (Carnicer et al. 2011; BfS 2013, Kemerink et al. 2012). Zudem gibt es herabgesetzte Meldeschwellen, ab denen der Strahlenschutzbeauftragte zu prüfen hat, ob und welche Faktoren bei einer Ersatzdosis ggf. zu berücksichtigen sind.

Dies verdeutlicht, dass nicht nur die Wahl der Messgröße, sondern auch die praktische Messposition einen erheblichen Einfluss auf die Aussagekraft der Dosimetrie hat. Dies betrifft sowohl potenzielle wissenschaftliche Studien als auch die Bewertung und Optimierung des praktischen Strahlenschutzes.

Auch bei der Augenlinsendosimetrie kann die gemessene Dosis je nach Lage des Dosimeters, unterschiedlich stark exponierter Augen, abhängig von der Schutzbrille und Expositionsgeometrie deutlich von der tatsächlichen Linsendosis abweichen (Hirakawa et al. 2022, Haga et al. 2017). Eine Änderung der operationellen Messgrößen löst das Problem der Messposition nicht.

Die konzeptionellen Unterschiede zwischen ICRU-Report 57 (ICRU 1998) und ICRU-Report 95 (ICRU 2020) sind bei Neutronen geringer als bei Photonen und Elektronen, da als physikalische Basisgröße für die Neutronendosimetrie bereits heute die Fluenz verwendet wird. Somit

ist die Verwendung von H^* statt $H^*(10)$ und H_p statt $H_p(10)$ das für Neutronen schlüssigere Konzept.

Allerdings sind die zu erwartenden Änderungen bei Verwendung von H^* und H_p im Allgemeinen kleiner als die systematischen Unsicherheiten der aktuell verwendeten praktischen Neutronendosimetrie. Die vorhandenen Dosimetertypen können die Energie- und Winkelabhängigkeiten der aktuellen Messgrößen nur grob nachbilden. Da sich für die vorgeschlagenen Messgrößen keine Änderungen insbesondere bei der schwierigen Messung von Neutronenstrahlung unter Berücksichtigung der Energie- und Winkelverteilung ergeben, sind signifikante Vorteile für die Neutronendosimetrie nicht zu erkennen.

Bezüglich der erweiterten Energiebereiche und Strahlenarten, für die die neuen Messgrößen geeignet wären, lässt sich für den praktischen Strahlenschutz festhalten: Andere Strahlenarten als Photonen, Elektronen und Neutronen oder Energiebereiche oberhalb 10 MeV für Photonen und Elektronen und 200 MeV für Neutronen spielen für den praktischen Strahlenschutz nur selten eine relevante Rolle. Medizinische Linearbeschleuniger arbeiten zwar typischerweise mit nominellen Photonenenergien bis etwa 15 MeV und Elektronenenergien bis etwa 21 MeV. Für den praktischen Strahlenschutz außerhalb des Nutzstrahls ist jedoch häufig nicht die maximale Primärstrahlenergie, sondern die durch Streu- und Leckstrahlung geprägte Strahlenqualität maßgeblich. Patienten- und Raumstreustrahlung weist dabei ein gegenüber dem Primärstrahl deutlich weiches Spektrum auf, sodass der überwiegende strahlenschutzrelevante Photonenanteil typischerweise unterhalb der nominellen Maximalenergie liegt. Einschränkend ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei hochenergetischen Photonenstrahlen, insbesondere mit einer Peakenergie oberhalb von etwa 10 MeV, auch Beschleuniger-Kopf-Leckstrahlung, Photoneutronen und Aktivierungsprodukte strahlenschutzrelevant werden können.

Hohe Energien und weitere Strahlenarten kommen darüber hinaus nur in wenigen Umgebungen wie Hochenergiebeschleunigern, großen Flughöhen oder im Weltraum vor. In den zwei zuletzt genannten Bereichen erfolgt die Dosisbestimmung bereits heute direkt anhand der Berechnung der Schutzgrößen. Basierend auf dem neuen Konzept ist hier ein tatsächlicher Vorteil zu sehen, da die dokumentierten Werte für die Exposition der beruflich strahlenexponierten Personen somit konsistenter untereinander wären. Inwieweit dies Konsequenzen für den praktischen Strahlenschutz hat, mit der potenziellen Ausnahme der besseren Erklärbarkeit, ist allerdings fraglich.

Wenn jedoch anstelle einer Punktmessung eine gesamte Expositionsumgebung, z. B. durch eine Video- und KI-unterstützte personendosimetrische Überwachung („Online-Dosimetrie“), betrachtet würde (EURADOS 2022, ICRP 2021a), könnte das Potenzial der neuen Messgrößendefinition nutzbar gemacht werden. Die Online-Dosimetrie befindet sich jedoch noch in der Entwicklung und wird absehbar nur in wenigen, gut definierten Umgebungen wie Operationsälen oder einzelnen kerntechnischen Anlagen möglich sein. Entsprechende Verfahren werden aktuell in europäischen Forschungsprojekten weiterentwickelt.

Da die neuen Messgrößen genauer den Schutzgrößen entsprechen, wären sie möglicherweise von Vorteil, z. B. bei juristischen Fragen im radiologischen Schädigungsfall oder für medizinische Fragestellungen.

In der Summe ist für die SSK derzeit nicht erkennbar, dass der praktische Strahlenschutz durch die Einführung der neuen Dosisgrößen wesentlich profitieren würde. Vielmehr könnten an einzelnen Stellen auch nachteilige Effekte entstehen. Dazu zählen insbesondere Diskontinuitäten in Dosisregistern und Langzeitstatistiken, wenn Messwerte vor und nach der Umstellung nicht

mehr unmittelbar vergleichbar sind. Ebenso besteht das Risiko, dass niedrigere Messwerte infolge geänderter Größen oder Kalibrierungen fälschlich als reale Verringerung der Exposition oder als erhöhtes Sicherheitsniveau interpretiert werden. Dies könnte in der Praxis zu einer nachlassenden Sorgfalt bei Arbeitsabläufen, einer geringeren Akzeptanz konservativer Schutzmaßnahmen oder zu schwächer dimensionierten Abschirm- und Überwachungskonzepten führen. Solche Effekte wären besonders kritisch, wenn sie nicht durch klare Übergangsregelungen, Parallelbewertungen und Kommunikationsmaßnahmen aufgefangen werden. Vor diesem Hintergrund ergibt sich aus Sicht des praktischen Strahlenschutzes derzeit kein hinreichender Bedarf für die Einführung neuer Messgrößen.

3.5 Auswirkungen auf die Herstellung von Strahlenschutzdosimetern

3.5.1 Allgemeine Sicht

Die aktuellen Messgrößen zur Abschätzung der effektiven Dosis, $H_p(10)$ und $H^*(10)$, sind als Dosis an einem einzigen Punkt in 10 mm Gewebetiefe definiert. Im Prinzip können daher heute Messgeräte aus gewebeäquivalentem Detektormaterial mit einem Filter aus 10 mm gewebeäquivalenten Material abgedeckt werden, um ein die Messgröße nachbildendes Dosimeter zu konstruieren. Sofern auch für den schrägen Einfall die 10 mm Dicke der Abdeckung aus gewebeäquivalentem Material gewährleistet ist, entspricht der vom Dosimeter angegebene Messwert auch unter schrägem Strahlungseinfall der Messgröße. Dieses Prinzip dient als Grundlage zur Konstruktion von einfachen Messgeräten.

Im Gegensatz dazu sind die neuen Messgrößen, H_p und H^* , als gewichtete Summe mehrerer Organe im Voxelpantom definiert. Durch die Betrachtung einer Definitionstiefenverteilung über das ganze Phantom ist diese „prinzipielle Nachbildung“ der Messgröße nicht mehr direkt mit einem einfachen Messgerät möglich. Vielmehr ist man auf die Verwendung von mehreren Detektoren angewiesen, deren Messsignale geeignet zur Gesamtanzeige kombiniert werden müssen. Das Messergebnis kann hierfür entweder als Linearkombination der einzelnen Messsignale oder aber, falls das nicht möglich ist, mittels nichtlinearer Algorithmen unter Umständen unter Verwendung von KI-basierten Ansätzen bestimmt werden. Derartige nichtlineare Algorithmen verwenden üblicherweise Signalverhältnisse von Einzeldetektoren, um daraufhin unterschiedliche Korrekturen an die Messsignale für die Dosisermittlung anzubringen (Pathan et al. 2025). Das führt jedoch dazu, dass die Signalverhältnisse bei kleinen Dosiswerten und Messsignalen recht unsicher werden und damit auch die ermittelten Dosiswerte. Alternativ können neuere Methoden wie künstliche Intelligenz (Rindhatayathon et al. 2025) verwendet werden, was neue Methoden zur Abschätzung der Messunsicherheit erfordert, prinzipiell aber machbar sein wird.

Bis heute gibt es jedoch noch keinen allgemeinen Nachweis, dass die bisherigen Normenanforderungen (DIN EN IEC 62387:2023-08, PTB 2013) erfüllbar bleiben, so dass ggf. die zulässigen Messabweichungen größer werden müssten. Ob dies erforderlich wird und, wenn ja, in welchem Maße, ist allerdings zurzeit unbekannt. Dieser Sachverhalt trifft auch auf die kommende Generation der sogenannten Hybriddosimeter zu, die wie passive Dosimeter eingesetzt werden sollen, jedoch zusätzlich über eine (elektronische) Ausleseinheit verfügen. Die potenziell möglichen zusätzlichen Messabweichungen müssten ggf. im Kontext des mit den neuen Messgrößen angestrebten Gewinns an Übereinstimmung mit den Schutzgrößen bewertet werden. Es ist aber zu berücksichtigen, dass dieser Beitrag im Vergleich zu anderen Unsicherheiten der praktischen Personendosimetrie, etwa Dosimeterposition, Trageweise, Expositionsgeometrie und inhomogenen Strahlungsfeldern eher nachrangig ist.

Die Aufwendungen zur Etablierung neuer Dosimeter verschiedener Arten seien im Folgenden den Einsatzzwecken gegenübergestellt.

Passive Strahlenschutzdosimeter werden im Allgemeinen zur amtlichen Überwachung durch die Messstellen eingesetzt und dienen zum Nachweis der Einhaltung der beruflichen Grenzwerte. Derzeit erhalten ca. 75 % der überwachten Personen keine signifikante effektive Dosis¹⁰ (BfS 2025). Von den verbleibenden 25 % werden lediglich 60 % mit Dosimetern überwacht, während die Dosis der restlichen 40 % in der Flugdosimetrie berechnet wird. Somit erhalten ca. 85 % der mit Dosimetern überwachten Personen keine messbare Dosis. Bei diesen Personen hätte die Einführung der neuen Messgrößen keine Auswirkung. Umgekehrt würden die Messwerte und berechneten Dosiswerte derjenigen Personen, die eine berufliche Strahlenexposition erhalten, konzeptionell besser zusammenpassen. Das Problem der Unsicherheiten bei der Dosisbestimmung löst dies aber nicht.

In den Fällen, in denen z. B. die Jahresdosis oder in Einzelmessungen die Grenzwerte erreicht oder überschritten werden, gibt es Verfahren zur Bewertung der Einzelmessungen, um durch ein Einbeziehen der konkreten Expositionsbedingungen unter Berücksichtigung der Energie-Winkel-Abhängigkeit des Dosimeters die effektive Dosis genauer abzuschätzen (SSK 2016). Systematische Unterschätzungen sind dabei möglich, insbesondere wenn das Dosimeter nicht repräsentativ für die höchstexponierten Körperbereiche getragen wird. Eine Änderung der Messgröße löst dieses praktische Problem der Dosimeterposition nicht.

In Deutschland werden überwiegend Dosimeter eingesetzt, bei denen lediglich ein Detektorelement für die Bestimmung der Messgröße $H_p(10)$ verwendet wird (siehe Abschnitt 3.5.2). Auf diese sind die Technik und Software ausgelegt. Bei derzeit etwa 400 000 überwachten Personen und einem Bedarf der 2,5-fachen Menge seitens der Messstellen für den praktischen Einsatz lassen sich insgesamt Kosten im zweistelligen Millionenbereich, für die erforderlich Neukonstruktion von Dosimetern oder der neuartigen Auslesesoftware und dem damit verbundenen Aufwand für Forschung und Entwicklung, Prüfung, Akkreditierung und Zulassung, erwarten (Figel 2024), die letztlich durch die Anwenderinnen und Anwender getragen werden müssten. Da in den allermeisten Fällen nur eine sehr geringe bzw. keine Dosis gemessen wird, auf die die vorgeschlagene Messgrößendefinition keinen Effekt hat, ist hieraus die Einführung der vorgeschlagenen Messgrößen nicht zu begründen.

Zurzeit befinden sich auch Personen in der amtlichen Überwachung, die in Bereichen tätig sind, wo grundsätzlich auf die Überwachung verzichtet werden könnte. Angesichts der durch die Einführung der neuen Messgrößen entstehenden vorgenannten Kosten ist zu erwarten, dass viele Personen aus nicht unmittelbar vorgeschriebenen Überwachungen herausgenommen werden, was dazu führen könnte, dass nicht erwartete bzw. ausnahmsweise hohe Dosiswerte nicht detektiert werden. Umgekehrt entsteht hier unter Umständen tatsächlich ein Potenzial zum Bürokratieabbau und zur Kostenersparnis, welches im Zuge einer Einführung neuer Messgrößen diskutiert werden könnte.

Unter der Annahme, dass es keine Reduzierung der mit Dosimetern amtlich überwachten Personen geben soll, besteht die Gefahr, dass sich der bereits heute bestehende Mangel an geeigneten Dosimetern verschärfen wird. Der wirtschaftliche Anreiz für Hersteller, in die Entwick-

¹⁰ Aufgrund von Rundungsregeln für die Berechnung der effektiven Dosis wird bei Messwerten unterhalb von 0,05 mSv für die effektive Dosis eine Dosis von 0,0 mSv angegeben - siehe (MessRL 2001 Richtlinie über Anforderungen an Personendosismessstellen nach Strahlenschutz- und Röntgenverordnung vom 10. Dezember 2001 (GMBI. 2002, Nr. 6, S. 136)).

lung zu investieren, ist begrenzt, da der potenzielle Absatzmarkt national, aber auch international klein ist. Müssen existierende, baumustergeprüfte Dosimeter ersetzt werden, besteht angesichts der begrenzten Mittel, die insgesamt für den Strahlenschutz zur Verfügung stehen, das Risiko, dass dadurch andere, möglicherweise dringlichere Geräteentwicklungen nicht erfolgen (siehe auch Abschnitt 3.9). Gelingt eine internationale Harmonisierung, dann könnte darüber ein größerer Bedarf und damit potenziell ein Interesse bei der Industrie geschaffen werden.

Es gibt aktuell bereits Bedarf an eichfähigen $H^*(10)$ -Ortsdosisleistungs-Messgeräten für Photonenenergien unterhalb 65 keV (hier gibt es bisher nur einen Gerätetyp) und insbesondere für gepulste Photonenstrahlung, für die bisher keines vorhanden ist. Auch für die Ortsdosisgrößen $H'(3)$ und $H'(0,07)$ gibt es keine eichfähigen Geräte.

Die Auswirkungen auf die aktiven Dosimeter sind bei der Ortsdosimetrie besonders gravierend. Aufgrund des bestehenden Mangels an baumustergeprüften aktiven Ortsdosimetern können sich die Sachverständigen oft nur mit „Verlegenheitslösungen“ behelfen und müssen dabei teilweise selbst auf Messgeräte zurückgreifen, die die nicht mehr gültigen alten Messgrößen messen, und dann möglichst geeignet umrechnen. Da die neuen Messgrößen keine Vereinfachungen der Konstruktion von Dosimetern mit sich bringen (siehe Abschnitte 3.5.2 und 3.5.3), würde sich diese Situation höchstens dann verbessern, wenn auf Grund internationaler Harmonisierung ein internationaler Bedarf nach baumustergeprüften Dosimetern entstünde.

Es kann davon ausgegangen werden, dass über einen Zeitraum von zehn Jahren oder mehr Ortsdosisleistungsmessgeräte für $H^*(10)$ und H^* parallel betrieben werden. Die entsprechenden Messgeräte könnten jeweils bauartzugelassen und geeicht sein und würden damit gültige, jedoch unterschiedliche Messwerte liefern. Eine einfache Umrechnung ist wegen der unterschiedlichen Energieabhängigkeiten nicht möglich.

Historisch gesehen wurde mit dem Wechsel von der Photonen-Äquivalentdosis H_X zur aktuell gültigen Messgröße $H^*(10)$ im Jahr 2001 aufgrund der neuen Konversionskoeffizienten der Zahlenwert einer Messung bei der Referenzstrahlung von 662 keV um 6 % erhöht. Er würde bei Einführung von H^* um 18 % abgesenkt – entsprechend den geänderten Konversionskoeffizienten. Bei 40 keV wurde der Zahlenwert im Jahr 2001 um 29 % erhöht und würde nun um 44 % abgesenkt werden. Bei 20 keV jedoch wurde der Zahlenwert um 46 % abgesenkt und würde nun nochmal um weitere 78 %, d. h. auf insgesamt nur noch 12 % des Anzeigewerts eines H_X -Messgeräts von vor 2001 abgesenkt. Da der Vorschlag der Einführung von H^* nicht auf zwischenzeitlich gewonnenen neuen Erkenntnissen zur Krebsinzidenz, sondern auf konzeptionellen Überlegungen beruht, ist ein Vertrauensverlust in das Konzept der (Orts-) Dosisleistungsmessung bei nutzenden Personen möglich.

Die direktere Verknüpfung von operationellen Messgrößen und Schutzgrößen ließe sich jedoch für kommende Generationen von im Strahlenschutz tätigen Personen andererseits einfacher kommunizieren.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich kein wesentlicher Nutzen durch die Änderung der Messgrößen, sondern es wären vielmehr Nachteile zu erwarten.

3.5.2 Technische Details zu passiven Dosimetern

Passive Dosimeter sind typischerweise Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) oder Dosimeter, die auf optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) basieren. Die in Deutschland typischerweise eingesetzten passiven Dosimeter sind TLD-100 (LiF:Mg,Ti), TLD-100H (LiF:Cu,P) oder BeO (OSL). Von den benannten passiven Detektormaterialien ist nur das BeO in etwa gewebeäquivalent. Die TLDs machen in etwa die Hälfte der weltweit eingesetzten Dosimeter aus

(McKeever et al. 1995). In Deutschland liegt ihr Anteil bei etwa 25 % bis 35 %. Sie nutzen einen bis vier Detektoren zur Messung der Personendosis $H_p(10)$.

In Deutschland werden von allen vier Messstellen Dosimeter eingesetzt, bei denen die Bestimmung von $H_p(10)$ mit einem Detektor erfolgt. Die meisten OSL-Dosimeter beinhalten aber mindestens zwei Detektorelemente. Für einfache Einzeldetektordosimeter (insb. Element-TLD- oder OSL-Dosimeter) wird in Simulationsstudien beschrieben, dass durch gezielte Modifikationen der Filterelemente prinzipiell auch unter ICRU95 ein normkonformes (z. B. IEC-konformes) Ansprechverhalten ab etwa 20 keV erreicht werden kann (Eakins und Tanner 2019, Hoedlmoser et al. 2020).

Es ist jedoch kritisch zu betonen, dass dies keineswegs einer einfachen, softwareseitigen Rekalibrierung der bestehenden Dosimetersysteme entspricht. Vielmehr erfordert dies eine konstruktive und hardwareseitige Anpassung des gesamten Dosimeteraufbaus (zumindest Filtermaterialien und -dicken). Für die Messstellen in Deutschland würde dies bedeuten, dass der vorhandene, bewährte und in hohen Stückzahlen am Markt befindliche Bestand an Dosimetergehäusen und -haltern recht aufwendig modifiziert werden müsste. Der damit verbundene logistische, administrative und finanzielle Aufwand ist erheblich. Eine andere Lösung stellen Mehrdetektorsysteme dar. Wie viele Detektorelemente erforderlich wären, um die aktuellen Anforderungen an die Messgenauigkeiten zu erfüllen ist noch offen. Manche der Mehrdetektorsysteme würden größer, schwerer und deutlich teurer sein, da die Detektormaterialien speziell bei TLDs sehr hohe Einkaufspreise haben. Für die OSL-Detektoren sind die Einkaufspreise geringer und es gibt Entwicklungen, die sich in Größe und Gewicht nur unwesentlich unterscheiden.

Noch größer wird die Auswirkung auf die gemischte Photonen-Neutronendosimetrie sein. Als passives Dosimeter wird in Deutschland das sogenannte Albedodosimeter eingesetzt, das auf Thermolumineszenz-Basis (LiF:Mg,Ti) als Vier-Elementsystem durch eine gezielte Filterung sowohl die Neutronen- als auch die Photonendosis bestimmt. Die Filterung dieses Dosimeters ist auf die Messung der Neutronenstrahlung hin optimiert. Es nutzt einen Detektor für die Messung der Photonenstrahlung und die restlichen zur Bestimmung der Neutronenstrahlung. Eine Anpassung des Dosimeters an die neue Messgröße H_p für Photonenstrahlung wird eventuell nicht möglich sein, da die Kassette im Hinblick auf die richtige Messung des Strahlungsanteils durch Neutronen optimiert ist. Aktuelle Zulassungen für die Photonenkomponente des Albedodosimeters zeigen, dass für niederenergetische Strahlung die Überschätzung so groß ist, dass alle Albedodosimeter eine untere Begrenzung des zugelassenen Energie- und Winkelbereichs haben. Dieses würde aufgrund der kleineren Konversionsfaktoren der neuen Messgrößen verschärft.

Eine Erweiterung des Albedodosimeters um weitere Detektoren würde zu noch größeren und schwereren Dosimetern führen, oder die Anwenderinnen und Anwender müssten zukünftig zwei Dosimeter tragen, d. h. je eines für Photonenstrahlung und Neutronenstrahlung. Das Tragen schwererer oder mehrerer Dosimeter durch die Anwenderinnen und Anwender bei nicht spürbarem Mehrwert birgt das Risiko geringerer Akzeptanz.

3.5.3 Aspekte zu aktiven Ortsdosimetern

Aktive Ortsdosimeter werden häufig zur Bestimmung von Kontrollbereichsgrenzen verwendet und müssen daher im unteren Dosisleistungsbereich zuverlässig einsetzbar sein. Ein Kontrollbereich ist durch die Möglichkeit einer effektiven Dosis von mehr als 6 mSv im Kalenderjahr definiert. Bei einer vereinfachenden Annahme von 2000 h Aufenthaltszeit entspricht dies einer mittleren effektiven Dosisleistung von $3 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

Mit der Einführung von H^* würde sich dabei nicht die zugrunde liegende Schutzgröße, also die effektive Dosis, ändern. Verändern würde sich jedoch die operationelle Messgröße, mit der das Strahlungsfeld bewertet und als praktischer Schätzwert für die Schutzgröße herangezogen wird. Aufgrund der im weichen Röntgenbereich geringeren Konversionskoeffizienten von H^* gegenüber $H^*(10)$ würde demselben physikalischen Detektorsignal ein niedrigerer Messwert zugeordnet. Die messtechnische Signalqualität des Detektors ändert sich dadurch zunächst nicht; verändert wird die Bewertung dieses Signals im Hinblick auf die Schutzgröße.

Damit verschiebt sich jedoch die bisherige konservative Sicherheitsmarge. $H^*(10)$ überschätzt in bestimmten niederenergetischen Photonenfeldern die effektive Dosis deutlich. Diese Überschätzung kann im praktischen Strahlenschutz hilfreich sein, weil sie bei der Festlegung von Kontrollbereichsgrenzen oder bei Leakage- und Streustrahlungsmessungen eine zusätzliche Konservativität enthält. Wird stattdessen H^* verwendet, kann die Anzeige im selben Strahlungsfeld niedriger ausfallen. Soll die bisherige konservative Bewertung beibehalten werden, müsste dies entweder durch geeignete Bewertungsfaktoren, durch konservative Kalibrierung oder durch entsprechend vorsichtige Festlegung von Einsatzbereichen berücksichtigt werden.

Andernfalls besteht die Gefahr, dass ein Messgerät formal korrekt H^* anzeigt, die daraus abgeleiteten praktischen Entscheidungen jedoch weniger konservativ ausfallen als bisher. Dies betrifft insbesondere Strahlungsfelder mit relevanten niederenergetischen Photonenanteilen, wie sie bei weicher Röntgenstrahlung sowie bei Leakage- oder Streustrahlungsmessungen auftreten können. Allerdings werden in den meisten Fällen konservative Abschätzungen verwendet und der Effekt tritt auch nur für weiche Röntgenstrahlung auf, dann aber für bekannte Felder und Raumgeometrien. Es bleibt zu entscheiden, ob die 5-fache Konservativität (für mono-energetische Strahlung bzw. in der Röntgendiagnostik bis zu einem Faktor 2) des heutigen Strahlenschutzsystems erforderlich und wünschenswert ist. Andererseits müssten die Grundlagen für die Veränderungen klar kommuniziert werden (siehe Abschnitt 3.8).

Zählende aktive Ortsdosisleistungsmessgeräte für Photonen werden wie erwähnt auch zur Leakage- und Streustrahlungsmessung verwendet. Gerade für solche Anwendungen kann eine im Vergleich zu $H^*(10)$ niedrigere Anzeige von H^* bei Photonenenergien unterhalb von etwa 70 keV praktisch relevant sein. Dabei ist nicht entscheidend, dass der Detektor bei gleichem Strahlungsfeld weniger Signal erzeugt. Vielmehr wird das vorhandene Signal im Rahmen der neuen Messgröße anders bewertet. Für Anwendungen, bei denen bisher die konservative Anzeige von $H^*(10)$ bewusst oder unbewusst zur sicheren Beurteilung genutzt wurde, kann dies bedeuten, dass zusätzliche konservative Bewertungsregeln erforderlich werden.

Als mögliche Ausweichstrategie könnten Hersteller auf aufwendige Neuentwicklungen oder tiefgreifende Modifikationen von Ortsdosisleistungsmessgeräten verzichten und stattdessen entweder den nominell ausgewiesenen Energiebereich oder den nominell ausgewiesenen Dosisleistungsbereich verändern. Messgeräte, die bisher beispielsweise ab etwa 20 keV spezifiziert waren, könnten weitgehend mit weitgehend unveränderter Energiecharakteristik weiter angeboten werden, wobei entweder der Anwendungsbereich für H^* erst ab einer höheren Energie, etwa ab 40 keV ausgewiesen würde, oder aber der Dosisleistungsbereich neu definiert würde. Im ersten Fall würde in Strahlungsfeldern mit relevanten Anteilen unterhalb dieses spezifizierten Energiebereichs ein solches H^* -Ortsdosisleistungsmessgerät dann nicht mehr im eigentlich spezifizierten Bereich betrieben. Je nach Energieverteilung könnten die angezeigten Werte konservativ erhöht oder mit größeren Unsicherheiten behaftet sein.

In bekannten Strahlungsfeldern könnte gegebenenfalls eine Anpassung über geeignete Kalibrier- oder Korrekturfaktoren erfolgen. Dies gilt praktisch für alle Felder in denen bekannte Strahler in bekannten Raumgeometrien betrieben werden. Bei digitalen Anzeigegeräten wäre eine solche Umrechnung grundsätzlich technisch unproblematisch. In unbekannten Strahlungs-

feldern wie z. B. bei mobilen Röntgeneinrichtungen mit möglicher niederenergetischer Komponente oder an Arbeitsplätzen mit wechselnden Arbeitsbedingungen und damit wechselnden Energieverteilungen wäre eine belastbare Um- oder Neukalibrierung jedoch schwierig und mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

In Tabelle 2 sind die für eine Umstellung auf die neue Messgröße H^* erforderlichen Änderungen für verschiedene Dosimetertypen zusammengefasst.

Tabelle 2: Übersicht der erforderlichen Änderungen für unterschiedliche Dosimetertypen bei Umstellung auf die neue Messgröße H^ .*

bisheriger Energiebereich $H^*(10)$	Detektor Typ	Neukalibrierung ausreichend	Software-Modifikation erforderlich	Hardware-Modifikation erforderlich	Neuer Energiebereich (H^*)	Sonstige Leistungsmerkmale	Kalibrierung bzw. Funktionstest mit ^{137}Cs
ab ca. 60 keV	alle Detektoren	Ja	Nein	Nein	unverändert oder zu niedrigen Energien verbessert	unverändert	unverändert
ab ca. 20 keV	Impulszählende oder strommessende Detektoren	Nein	Nein	Zusätzliche Hardwarefilterung (z.B. Cu, Sn, Pb)	Einzelfallbeurteilung erforderlich	Verschlechterung beim Einsatz zur Leckage- oder Kontaminationssuche	Erhöhte Notwendigkeit einer zusätzlichen Prüfung mit Röntgenstrahlung
ab ca. 20 keV	Detektoren mit Pulshöhenbewertung (Spektralanalyse) oder Multi-Sensor Detektoren	Nein	Ja	Eventuell kleinere Detektoren für Röntgenstrahlung, eventuell neue Hardware-Filterung	Einzelfallbeurteilung erforderlich	Eventuell Einschränkung des Dosisleistungsbereichs im Röntgenbereich oder der Spürempfindlichkeit	Erhöhte Notwendigkeit einer zusätzlichen Prüfung mit Röntgenstrahlung

3.5.4 Weitere Dosimetertypen

Im Bereich der Neutronendosimetrie bilden die aktuell vorhandenen Dosimetertypen die Energie- und Winkelabhängigkeit der aktuellen Messgrößen nur grob ab. Sie können grundsätzlich weiterverwendet werden, da die zu erwartenden Änderungen im Wesentlichen kleiner sind als die aktuellen systematischen Unsicherheiten der praktischen Neutronendosimetrie. Für die gängigen Kalibrierfelder für Neutronenstrahlung wurden die Änderungen in den Konversionskoeffizienten bereits untersucht, sie liegen im Bereich bis zu etwa 20 % (Al Qaaod et al. 2023). Lediglich Um diesen Betrag würden sich auch die Kalibrierfaktoren von Geräten ändern.

Im Bereich der Photonendosimetrie würde sich für die lokale Hautdosis und die Augenlinsendosis durch Einführung der neuen Messgrößen nicht viel ändern, da sich die entsprechenden Konversionskoeffizienten für die aktuellen und die neuen Messgrößen nur wenig voneinander unterscheiden. Kalibrierungen könnten umgerechnet und vorhandene Ring- bzw. Augenlinsendosimeter größtenteils weiterverwendet werden.

Im Bereich der Elektronen- bzw. Betastrahlung müssten für die lokale Hautdosis und somit für existierende Ringdosimeter lediglich Kalibrierfaktoren geringfügig angepasst werden. Die zugelassenen Ringdosimeter könnten größtenteils weiterverwendet werden. Dosimeter zur Be-

stimmung der Augenlinsendosis sind für Betastrahlung bisher nicht verfügbar, so dass sich die Frage nach einer Weiterverwendbarkeit nicht stellt.

3.5.5 Weitere Auswirkungen auf den Normungsbereich

Anforderungen an Strahlenschutz-Dosimeter sind zumeist in IEC- und teilweise in ISO-Normen niedergelegt (IEC 60846-1: 2009, IEC 60846-2: 2015, DIN EN IEC 62387:2023-08, DIN IEC 61526: 2020-08, IEC 61005:2014, ISO 21909-1:2021, ISO 21909-2:2021). Hier wäre eine Überarbeitung einer größeren Zahl von Normen erforderlich, indem im Wesentlichen die Begriffe der Messgrößen angepasst werden müssten. Gegebenenfalls müssen die Anforderungen etwas gelockert werden, da, wie in Abschnitt 3.4 ausgeführt, keine einfache „Nachbildung“ der Messgröße in einem einfachen Dosimeter möglich ist und die bisherige Qualität nicht erreicht werden kann (Pathan et al. 2025). Die Überarbeitungen könnten bei moderatem Mehraufwand im Rahmen der üblichen Aktualisierungen zur allgemeinen Verbesserung und/oder Erweiterung erfolgen.

3.6 Anpassung der Prüf- und Kalibrierbedingungen

Dosimeter werden in Referenzstrahlungsfeldern (bei Photonen unter Sekundärelektronengleichgewicht (SEG)) geprüft bzw. kalibriert. Diese Felder sind genormt in drei ISO-Normenreihen für Photonen, Neutronen und Elektronen. Für alle diese Strahlungsfelder sind die Konversionskoeffizienten für die neuen Messgrößen bereits vorhanden (Behrens und Otto 2022, Al Qaaod et al. 2023 und Behrens 2021). Somit wäre die Überarbeitung der entsprechenden Normen relativ leicht durch Anpassung von Konversionskoeffizienten durchführbar.

Vor dem Hintergrund, dass reale Arbeitsplatzfelder von den idealisierten Referenzstrahlungsfeldern abweichen können und ein Sekundärelektronengleichgewicht dort nicht in jedem Fall gegeben ist, könnten ergänzende Prüf- oder Kalibrierbedingungen künftig Gegenstand der Normungsdiskussion werden. Entsprechende Fragestellungen werden international bereits diskutiert, unter anderem für ^{137}Cs - und ^{60}Co -Referenzstrahlungsfelder im Hinblick auf das Sekundärteilchengleichgewicht (Behrens et al. 2009) sowie im Zusammenhang mit der Detektorantwort auf neue operationelle Messgrößen (Otto 2019). Sollten zukünftig Kalibrierungen jedoch auch unter Nicht-SEG-Bedingungen durchgeführt werden, so müssten die Normen für Photonen-Referenzstrahlungsfelder um entsprechende Verfahren erweitert werden.

3.7 Abschätzung der Beständigkeit der neuen operationellen Größen

Im vorgeschlagenen, wie auch im aktuell gültigen System, ist zu berücksichtigen, dass biologische Wichtungsfaktoren und Referenzphantome historisch keine unveränderlichen Größen waren, sondern immer wieder an neue wissenschaftliche Erkenntnisse angepasst wurden. Dies betrifft sowohl Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R als auch Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T . So wurden diese Größen in ICRP-Publikation 103 (ICRP 2007) gegenüber früheren Empfehlungen revidiert; ebenso wurden die phantombasierten Berechnungsgrundlagen durch die voxelbasierten Referenzphantome der ICRP-Publikation 110 (ICRP 2009) und die darauf aufbauenden Konversionskoeffizienten der ICRP Publikation 116 (ICRP 2010) weiterentwickelt. Zukünftige Anpassungen von w_R , w_T und Referenzphantomen sind daher als grundsätzlich mögliche Folge der fortlaufenden wissenschaftlichen Weiterentwicklung des Systems möglich.

Insbesondere der Übergang von Voxel- zu Meshphantomen zeigt, dass die anatomisch-dosimetrischen Berechnungsgrundlagen des Strahlenschutzsystems fortentwickelt werden. Solche Änderungen betreffen jedoch zunächst die Berechnung von Organ- und Gewebedosen sowie

der daraus abgeleiteten Schutzgrößen und Konversionskoeffizienten (Bozzato et al. 2026), nicht unmittelbar die numerischen Grenzwerte. Im vorgeschlagenen System könnten derartige Änderungen konzeptionell zwar direkt in die Definition der Messgröße übernommen werden. Dies würde jedoch die langfristige Stabilität von Messgeräteanforderungen und Kalibrierungen schwächen. Im aktuellen System sind die operationellen Messgrößen stärker von Änderungen der Schutzgrößen entkoppelt, so dass neue biologische oder anatomische Erkenntnisse nicht zwangsläufig grundlegende Änderungen an Dosimeteranforderungen nach sich ziehen (ICRP 2020b, ICRP 2021b). Umgekehrt hieße dies, dass die Repräsentativität der Schutzgrößen durch die Messgrößen sich verändern würde, wenn die Wichtungsfaktoren angepasst werden, die Berechnungsgrundlagen der Messgrößen aber nicht analog angepasst würden.

Der wesentliche Unterschied besteht also darin, dass die operationellen Messgrößen im aktuellen System bewusst als praktische, konservative Ersatzgrößen für die nicht direkt messbaren Schutzgrößen definiert sind. Änderungen an biologischen Wichtungsfaktoren, Risikomodellen oder Referenzphantomen wirken daher zunächst auf die Berechnung und Bewertung der Schutzgrößen, nicht aber zwangsläufig unmittelbar auf die Kalibriergröße eines Dosimeters. Im vorgeschlagenen System nach ICRU-Report 95 (ICRU 2020) wäre die Messgröße dagegen stärker an die jeweils aktuellen Schutzgrößen und deren Berechnungsmodelle gekoppelt. Dadurch könnten neue wissenschaftliche Erkenntnisse zwar direkter berücksichtigt werden. Zugleich würde aber die langfristige Stabilität der Messgröße abnehmen, weil Änderungen an Phantomen, Wichtungsfaktoren oder Konversionskoeffizienten eher zu geänderten Kalibrierfaktoren, Prüfanforderungen oder Gerätespezifikationen führen könnten.

Die vereinfachenden Annahmen der aktuell gültigen Messgrößen führen somit zu einer größeren Beständigkeit als die Definitionen im vorgeschlagenen System. Da sich im vorgeschlagenen System die Messgrößen an den Schutzgrößen orientieren, würden sowohl geänderte w_R - und w_T -Werte als auch neue Phantome für die Berechnung der Schutzgrößen eher Änderungen der Messgrößen nach sich ziehen. Somit wären Diskontinuitäten im praktischen Strahlenschutz und das Erfordernis immer neuer Dosimeter im vorgeschlagenen System wahrscheinlicher. Die Erfahrungen im aktuellen System und insbesondere auch im Hinblick auf den weltpolitischen Kontext lassen zudem nicht erwarten, dass sich solche Verfeinerungen im internationalen Rahmen einheitlich umsetzen lassen, mit entsprechenden Nachteilen bezüglich der Vergleichbarkeit.

3.8 Kommunikative Risiken und erfolgskritische Faktoren

Die Kommunikation im Bereich ionisierender Strahlung ist herausfordernd. Dies gilt insbesondere für die radiologische Risikokommunikation im Rahmen des Strahlenschutzes. Die Herausforderung entsteht unter anderem durch die hohe Komplexität des Strahlenschutzsystems unter Verwendung zahlreicher Dosisgrößen. Aufgrund der Natur der ionisierenden Strahlung, die ohne technische Hilfsmittel nicht wahrzunehmen ist, und aufgrund anderer Einflussfaktoren kommt bei der Risikowahrnehmung in der Bevölkerung zudem eine emotionale Komponente jenseits der wissenschaftlichen Evidenz hinzu (IAEA 2012, Slovic et al. 2004). Jede Änderung von Messgrößen, die dem Strahlenschutzsystem zugrunde liegen, hat daher potenziell Auswirkungen auf die Wahrnehmung und das Verständnis von Maßnahmen des Strahlenschutzes und auf das Vertrauen in diesen.

Es sollten daher bei der Abwägung der Sinnhaftigkeit einer Einführung der vorgeschlagenen neuen Messgrößen auch Risiken und Aufwände, die aus der notwendigen, begleitenden Kommunikation entstehen, genauso berücksichtigt werden wie auf der anderen Seite die prinzipielle

Vereinfachung des Systems. Eine Einschätzung entsprechender Aufwände kann an dieser Stelle nur qualitativ erfolgen.

3.8.1 Erfolgsfaktoren einer effektiven Veränderungskommunikation

Veränderungen machen für Betroffene Anpassungen notwendig (näher in Abschnitt 3.8.3 ausgeführt). Erfolgen diese Anpassungen nicht oder nur teilweise im Sinne eines nach der Veränderung gewünschten Sollzustandes, ist die Zielsetzung der Veränderung gefährdet (Lewin 1947). Grund dafür ist häufig eine mangelnde Motivation der Betroffenen, die Veränderungen mitzutragen. Um diese Motivation zu erzeugen und zu erhalten, ist über den Veränderungsprozess hinweg eine effektive Veränderungskommunikation nötig. Der Erfolg dieser Kommunikation hängt von mehreren Faktoren bzw. Fragen ab (Armenakis und Harris 2002):

- Ist die Veränderung nötig/sinnvoll?
- Rechtfertigt das Resultat den Aufwand?
- Sind die nötigen Fähigkeiten und finanziellen Mittel vorhanden?
- Werden alle Betroffenen gleichermaßen mitziehen und die Veränderung umsetzen?
- Ist die Veränderung nicht nur allgemein vorteilhaft, sondern potenziell auch für jeden Betroffenen individuell?

Eine erfolgreiche Veränderungskommunikation und damit eine erfolgreiche Implementierung einer Neuerung setzt die Bejahung möglichst vieler dieser Fragen voraus.

3.8.2 Aspekte der Risikokommunikation

Die Einführung neuer Messgrößen an sich berührt zunächst keine Fragen der Risikokommunikation. Indirekt kann es durch die Auswirkungen der Einführung der Messgrößen jedoch sehr wohl zu Einflüssen auf die Wahrnehmung radiologischer Risiken und deren individueller Bewertung kommen. Diese sollten in der Risikokommunikation berücksichtigt und in der begleitenden Kommunikation zur Einführung der Messgrößen thematisiert werden.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Veränderungen in der Personen- und Ortsdosimetrie zu richten, wo es durch die Einführung im Bereich der Photonen-Referenzstrahlung und insbesondere im niederenergetischen Röntgenbereich zu einer signifikanten Verringerung der angezeigten Dosiswerte kommen würde. Dies sollte kommunikativ eingeordnet und erklärt werden, damit es nicht zu einer Fehleinschätzung radiologischer Risiken kommt. Als potenziell positiver Aspekt ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Zusammenhang zwischen den neuen operationellen Messgrößen und den Schutzgrößen unmittelbarer und damit intuitiver wird. Dadurch könnten berechnete Dosiswerte, beispielsweise für Flugpersonal, und gemessene Dosiswerte, beispielsweise für medizinisches Personal, einfacher in Beziehung gesetzt werden. Schulungs- und Kommunikationsaufwand ließe sich reduzieren und langfristig parallele Interpretations- oder Umrechnungsschritte vermeiden. Solche Vereinfachungen wären allerdings erst nach einer abgeschlossenen Übergangsphase und einer konsistenten Umsetzung in Normung, Kalibrierung und regulatorischer Praxis zu erwarten.

Andererseits könnte im Übergangszeitraum die gleichzeitige Benutzung von $H^*(10)$ und H^* (und eventuell noch von H_X) zu Verwirrung, mangelnder Konsistenz und damit zu Unsicherheit in allen Anwendungsbereichen führen. Eine so erzeugte Unsicherheit kann zu einem Glaubwürdigkeits- und Vertrauensverlust in den Strahlenschutz führen, da Konsistenz und Widerspruchsfreiheit Voraussetzungen für eine effektive Risikokommunikation sind (BBK 2022).

3.8.3 Kommunikative Auswirkungen nach Bezugsgruppen

a) Fachpersonal im Bereich Dosimetrie

Bei Fachpersonal im Bereich Dosimetrie ist grundsätzlich zu erwarten, dass die in (ICRU 2020) beschriebenen Veränderungen bekannt sind und über entsprechende fachliche und wissenschaftliche Plattformen oder über die Foren internationaler Organisationen bereits diskutiert werden. Hier könnten sich Kommunikationsbemühungen seitens der für die Einführung verantwortlichen Behörden auf den Zeitplan und konkrete gesetzliche Vorgaben beschränken. Risiken sind lediglich in einer inkonsistenten Kommunikation hinsichtlich Umsetzungszeiträumen und anderer regulatorischer Parameter zu sehen. Fachpersonal im Bereich Dosimetrie sollte in alle Kommunikationsmaßnahmen gegenüber weiteren Zielgruppen eingebunden werden, um die komplexen Zusammenhänge in verständliche Botschaften für Nicht-Expertinnen und -Experten zu übersetzen.

b) Fachpersonal Strahlenschutz

Auch wenn Expertinnen und Experten im Strahlenschutz bereits über ein umfangreiches Verständnis für Aspekte der Dosimetrie verfügen, sind in diesem Bereich Kommunikationsmaßnahmen und Schulungen hinsichtlich der Zielsetzung, der konkreten Auswirkungen und des Kosten-Nutzen-Verhältnisses nötig. Gerade Strahlenschutzbeauftragte in Betrieben und Organisationen müssen die Veränderungen und deren Nutzen nach Innen tragen, um deren korrekte Umsetzung durch alle Anwenderinnen und Anwender zu garantieren. Es wäre wünschenswert, ein bundesweit einheitliches Kommunikationskonzept zu erarbeiten und bereitzustellen, um eine konsistente Information über alle Betriebe und Organisationen hinweg sicherzustellen.

Auch im Bereich des Notfallschutzes sollten weitreichende Kommunikationsmaßnahmen in der Fachöffentlichkeit und durch Schulungen ergriffen werden. Eine mögliche Verwirrung durch parallel genutzte alte und neue Messgrößen mit abweichenden Messwerten wäre in einem Notfall besonders kritisch zu bewerten.

c) Medizinisches Personal

Im Bereich medizinischer Anwendungen könnten sich durch die Einführung der neuen Messgrößen Möglichkeiten für einen optimierten Strahlenschutz für das Personal eröffnen, denn bei gleicher Exposition würden sich, insbesondere in der Radiologie, reduzierte Dosiswerte ergeben (siehe Abschnitt 3.2). Hier wäre eine umfangreiche Kommunikationskampagne hinsichtlich der Auswirkungen und dem Umgang mit den neuen Messgrößen nötig. Dabei müssen Informationen bereitgestellt werden, um entstehende Möglichkeiten für gezieltere und damit weniger kostenintensive Strahlenschutzmaßnahmen zu erklären und dabei auf ein weiterhin hinreichendes Schutzniveau hinzuweisen.

d) Beruflich Strahlenschutzüberwachte und Einsatzkräfte

Den Großteil der derzeit ca. 400 000 (BfS 2025) beruflich strahlenschutzüberwachten Personen bildet das unter c) bereits adressierte medizinische Personal. Hinzu kommen unter anderem Personen aus der Kerntechnik und der allgemeinen Industrie. Auch für diese Personengruppe müssten die Inhalte der Fachkurse zum Strahlenschutz ergänzt und zusätzliches Informationsmaterial entwickelt werden.

Im Bereich der Einsatzkräfte muss mit intensivem Kommunikationsbedarf gerechnet werden. Bereits die Novellierung der Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 500 (AFKzV 2022), die erst 2022 in Kraft getreten ist, wurde durch kontroverse Diskussionen hinsichtlich der Erhöhung des Referenzwertes bei einem Einsatz zum Schutz der Umwelt oder von Sachgütern von 15 mSv auf 20 mSv begleitet. Auch wenn der Referenzwert durch eine Einführung neuer Mess-

größen nicht berührt würde, könnte es durch die etwaige Anpassung von Dosimetern sowie durch dann niedrigere Messwerte zu einer Skepsis und zu erneuten Diskussionen hinsichtlich radiologischer Risiken im Einsatz kommen.

e) Allgemeine Öffentlichkeit/Medien

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass eine mögliche Einführung der vorgeschlagenen Messgrößen ohne weiteren Anlass kein dauerhaftes öffentliches Interesse erzeugen wird. Eine auf die allgemeine Öffentlichkeit abzielende Kommunikationskampagne scheint damit unnötig. Bei der Veröffentlichung zur Entscheidung neuer Messgrößen könnte es zu vereinzelter Berichterstattung kommen. Hier besteht ein kleines Risiko, dass durch abgesenkte Messwerte aus Unverständnis oder bewusst ein vermindertes Schutzniveau suggeriert wird und so das Vertrauen in den Strahlenschutz beschädigt werden könnte. Problematischer wären dagegen widersprüchliche Informationen durch inkonsistente Dosis- und Dosisleistungsangaben im Falle eines Notfalls durch parallel verwendete alte und neue Messgrößen oder durch inkonsistente Anwendung der Messgrößen in verschiedenen Staaten bei grenzüberschreitenden Notfällen. Insofern ist auf jeden Fall ein einheitliches System zumindest mit den Nachbarstaaten oder bspw. innerhalb der europäischen Gemeinschaft anzustreben.

3.8.4 Summarische Einschätzung zur Kommunikation

Eine Einführung neuer Messgrößen nach (ICRU 2020) birgt sowohl Vorteile als auch gewisse Risiken und würde beträchtliche Kommunikationsaufwendungen bedeuten. Im Bereich der Veränderungskommunikation ist es für die erfolgreiche Implementierung notwendig, den besonders betroffenen Bezugsgruppen ein eindeutig positives Nutzen-Kosten-Verhältnis zu vermitteln. Während mit hohen Implementierungskosten durch technische Umstellungen, Schulungs- und Kommunikationsmaßnahmen zu rechnen ist, wird ein relevanter Nutzen für den praktischen Strahlenschutz aktuell nicht gesehen.

Basierend auf der Erfahrung bei der Einführung der aktuellen Messgrößen wäre mit einer längeren Implementierungszeit von bis zu zwei Jahrzehnten zu rechnen, während der die Einführung auch kommunikativ begleitet werden muss.

3.9 Mögliche Langzeitauswirkungen im Falle einer Nicht-Einführung

Die Entscheidung zur möglichen Einführung der ICRU95 Messgrößen ist keine unabhängige nationale Entscheidung. In Europa wäre eine Einführung mit einer Änderung der Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014) verbunden, die in den nationalen Strahlenschutzgesetzgebungen umzusetzen ist. Bei der Herbeiführung des entsprechenden europäischen Konsenses sollte die internationale Situation Beachtung finden bzw. beeinflusst werden, u. a. der Umgang bei der IAEA mit den neuen Messgrößen.

Eine europäische und internationale Abstimmung ist für eine Entscheidung ausschlaggebend, da ein international uneinheitliches Vorgehen die Nachteile mangelnder Harmonisierung, Diskontinuitäten und Kosten sowie einer komplexeren internationalen Normung mit sich brächte. Zudem wäre ein erhöhter Kommunikationsaufwand erforderlich, um die dann nebeneinander bestehenden unterschiedlichen Systeme von Messgrößen nachvollziehbar zu erklären. Dies gilt umgekehrt auch, wenn international die neuen Größen eingeführt würden und z.B. nur Deutschland dies nicht täte. Darüber hinaus könnten uneinheitliche Messgrößensysteme auch Risiken für den praktischen Strahlenschutz erzeugen, wenn Messergebnisse zwischen Ländern, Tätigkeitsbereichen oder Überwachungssystemen nicht mehr unmittelbar vergleichbar sind oder unterschiedlich interpretiert werden. Dies könnte zu Fehlbewertungen von Expositionssituatio-

nen, Unsicherheiten bei der Dosisüberwachung und Verzögerungen bei Schutzmaßnahmen führen, insbesondere in grenzüberschreitenden Arbeitsverhältnissen, bei international tätigen Unternehmen, in der Luftfahrt, im medizinischen Bereich sowie im Notfallschutz.

3.10 Fazit

Insgesamt schätzt die SSK ein, dass die Einführung der vorgeschlagenen Messgrößen einen wissenschaftlichen Nutzen bringen könnte, jedoch aktuell keine relevanten Vorteile für den praktischen Strahlenschutz hätte, dem die Messgrößen hauptsächlich dienen. Es ist jedoch festzustellen, dass die neu vorgeschlagenen Messgrößen einen direkten Bezug zu den Schutzgrößen haben und somit wissenschaftlich fundiert abgeleitet sind (siehe auch Otto et al. 2026).

Hieraus ergeben sich grundsätzlich konzeptionelle Vorteile, beispielsweise

- eine engere Anbindung an die Schutzgrößen,
- eine bessere Vergleichbarkeit mit berechneten Dosiswerten des fliegenden Personals,
- mögliche Vorteile bei bestimmten medizinischen Fragestellungen
- sowie nach vollständiger Umstellung ein potenziell einfacher zu erklärendes Gesamtsystem.

Nach Auffassung der SSK werden diese Vorteile jedoch erheblich durch andere Unsicherheiten überlagert. Hierzu zählen insbesondere

- individuelle anatomische Unterschiede,
- die Position und Tragweise von Dosimetern,
- inhomogene Strahlungsfelder sowie weitere Unsicherheiten der praktischen Dosimetrie.

Hinzu kommen der Aufwand und die Herausforderungen einer langjährigen Übergangsphase.

Daher bleibt festzuhalten, dass die SSK im Kontext der praktischen Umsetzung gerade in Zeiten des angestrebten Bürokratierückbaus und unter Berücksichtigung des mit einer Einführung verbundenen Anpassungsaufwandes eine Umstellung aktuell für nicht sinnvoll erachtet.

Das aktuell gültige System kann als gut funktionierend und angemessen angesehen werden.

In Fällen, wo die aktuellen Messgrößen wie $H^*(10)$ und $H_p(10)$ nicht hinreichend geeignet sind, haben sich Alternativen etabliert (in der Flugdosimetrie z. B. die direkte Verwendung der effektiven Dosis). Die Bewertung von Schutzniveaus oder Innovationshemmnissen hängt nicht primär von den Definitionen der Messgrößen ab, sondern von Grenzwerten und normativen Vorgaben. Somit entstehen jenseits der Frage der internationalen Harmonisierung keine signifikanten Nachteile bei einer Nichteinführung. Die internationale Harmonisierung wäre allerdings ein entscheidender Vorteil und in jedem Fall anzustreben, aus Sicht der SSK zurzeit vorzugsweise basierend auf dem geltenden System der operationellen Messgrößen. Diese Empfehlung stellt ausdrücklich eine Bewertung der derzeitigen Rahmenbedingungen dar und schließt eine spätere Neubewertung bei veränderten internationalen Randbedingungen nicht aus.

Literatur

- AFKzV 2022 Ausschuss für Katastrophenschutz, Feuerwehrwesen und zivile Verteidigung (AFKzV). Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 500. Einheiten im ABC-Einsatz. https://www.sfs-w.de/projektgruppe-feuerwehr-dienstvorschriften/vom-afkzv-verabschiedet-und-zur-einfuehrung-in-den-laendern-empfohlen.html?no_cache=1&download=FwDV500_AFKzV_2022-03-16_final.pdf&did=86, zuletzt aufgerufen am 08.12.2020
- Al Qaaod et al. 2023 Al Qaaod AA, Reginatto M, Zbořil M, Zimbal A. The impact of new ICRU95 quantities and spectrum data on the dosimetric quantities of the neutron reference fields at PTB. *Radiat Prot Dosimetry*. 2023 Apr 19;199(6):572-9, doi: 10.1093/rpd/ncad046
- Alberts et al. 1994 Alberts WG, Ambrosi P, Böhm J, Dietze G, Hohlfeld K, Will W. Neue Dosis-Messgrößen im Strahlenschutz. Bericht PTB-Dos-23. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 1994, ISBN 3-89429-507-4
- Armenakis und Harris 2002 Armenakis AA, Harris SG. Crafting a change message to create transformational readiness. *Journal of Organizational Change Management*. 2002;15:169-83
- BBK 2022 Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK). Risikokommunikation. Ein Handbuch für die Praxis. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Risikomanagement/handbuch-risikokommunikation.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt aufgerufen am 18.05.2026
- Behrens et al. 2009 Behrens R, Kowatari M, Hupe O. Secondary charged particle equilibrium in ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co reference radiation fields. *Radiat Prot Dosimetry*. 2009 Sep;136(3):168-75, doi: 10.1093/rpd/ncp173, Epub 20090915
- Behrens 2021 Behrens R. Conversion coefficients from absorbed dose to tissue to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for beta reference radiation qualities. *J Radiol Prot*. 2021 Nov 18;41(4), doi: 10.1088/1361-6498/abf94f, Epub 2021/04/20
- Behrens und Otto 2022 Behrens R, Otto T. Conversion coefficients from total air kerma to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for photon reference radiation qualities. *J Radiol Prot*. 2022 Jan 25;42(1), doi: 10.1088/1361-6498/abc860, Epub 2020/11/07

- BfS 2013 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Strahlenschutz beim Umgang mit Betastrahlern in der Nuklearmedizin einschließlich der Positronen-Emissions-Tomografie (PET). Empfehlungen für Ärzte und medizinisches Personal auf der Basis neuer Erkenntnisse. https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/fachinfo/strahlenschutz-umgang-mit-betastrahlern.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt aufgerufen am 24.06.2026
- BfS 2025 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Die berufliche Strahlenexposition in Deutschland 2024 - Bericht des Strahlenschutzregisters. Bundesamt für Strahlenschutz, Fachgebiet Beruflicher Strahlenschutz, Strahlenschutzregister. 18. Dezember 2025, BfS-Berichte 73/25. urn:nbn:de:0221-2025112457250
- Boetter-Jensen et al. 2003 Boetter-Jensen L, McKeever SWS, Wintle AG. Optically Stimulated Luminescence Dosimetry. Elsevier Science, 2003, ISBN 9780080538075
- Bossin et al. 2024 Bossin L, Carbonez P, Christensen JB, Furlan M, Fürholz F, Mayer S, Pitzschke A, Yukihara EG. Implications of the ICRU 95 quantities for various personal dosimetry techniques. Radiat. Meas. 2024 2024/08/01/;176:107207, doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107207>
- Bozzato et al. 2026 Bozzato D, Cerutti F, Froeschl R, Otto T, Theis C, Vlachoudis V and Widorski M. Conversion coefficients for effective dose calculated using anthropomorphic mesh reference phantoms with the FLUKA code. J. Radiol. Prot. 2026 46 011510, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ae3d43>
- Carnicer et al. 2011 Carnicer A, Sans-Merce M, Baechler S, Barth I, Donadille L, Ferrari P, Fulop M, Ginjaume M, Gualdrini G, Krim S, Mariotti M, Ortega X, Rimpler A, Ruiz N, Vanhavere F. Hand exposure in diagnostic nuclear medicine with 18F- and 99mTc-labelled radiopharmaceuticals - Results of the ORAMED project. Radiat. Meas. 2011;46(11):1277-82, doi: 10.1016/j.radmeas.2011.07.019
- Cho 2017 Cho KW. The Work of ICRP on the Ethical Foundations of the System of Radiological Protection. Radiat Prot Dosimetry. 2017 Apr 1;173(1-3):49-54, doi: 10.1093/rpd/ncw309
- DIN 6814-3:2016-08 Deutsches Institut für Normung. DIN 6814-3:2016-08. Begriffe in der radiologischen Technik - Teil 3: Dosimetrie.
- DIN EN 61267:2009-01 Deutsches Institut für Normung. DIN EN 61267:2009-01. Medizinische diagnostische Röntgeneinrichtung - Bestrahlungsbedingungen zur Bestimmung von Kenngrößen (IEC 61267: 2005); Deutsche Fassung EN 61267:2006

- DIN EN IEC 62387:2023-08 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN IEC 62387:2023-08. Strahlenschutz-Messgeräte - Dosimetriesysteme mit integrierenden passiven Detektoren zur Personen-, Arbeitsplatz- und Umgebungsüberwachung auf Photonen- und Betastrahlung.
- DIN IEC 61526: 2020-08 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN IEC 61526: 2020-08. Strahlenschutz-Messgeräte - Messung der Tiefen- und der Oberflächen-Personendosis Hp(10), Hp(3) und Hp(0,07) für Röntgen-, Gamma-, Neutronen- und Betastrahlung - Direkt ablesbare Personendosimeter.
- DIN IEC/TR 62461:2015-07 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN IEC/TR 62461:2015-07. Strahlenschutz-Messgeräte - Bestimmung der Unsicherheit beim Messen.
- Eakins und Tanner 2019 Eakins JS, Tanner RJ. The effects of revised operational dose quantities on the response characteristics of a beta/gamma personal dosimeter. J Radiol Prot. 2019 Jun;39(2):399-421, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab0443>, Epub 20190204
- EURADOS 2022 European Radiation Dosimetry Group (EURADOS). Evaluation of the Impact of the New ICRU Operational Quantities and Recommendations for their Practical Application. EURADOS Report 2022-02, 2022, doi: <https://doi.org/10.12768/yxy4-5q82>
- Euratom 2014 Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates der Europäischen Union vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom. Amtsblatt der Europäischen Union, L 13/1, 17.01.2014
- Figel 2024 Figel M. ICRU95 and the future individual monitoring. Beitrag während des Workshops "Fit for purpose: A German contribution to the new ICRP recommendations" https://www.bfs.de/EN/bfs/science-research/collaborations/workshop/workshop-icrp_node.html, zuletzt aufgerufen am 19.05.2026
- Frenzel et al. 2014 Frenzel T, Grohmann C, Schumacher U, Krüll A. Partial body irradiation of small laboratory animals with an industrial X-ray tube. Z Med Phys. 2014 Dec;24(4):352-62, doi: 10.1016/j.zemedi.2014.02.002, Epub 20140312
- Haga et al. 2017 Haga Y, Chida K, Kaga Y, Sota M, Meguro T, Zuguchi M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Sci Rep. 2017 Apr 3;7(1):569, doi: 10.1038/s41598-017-00556-3, Epub 20170403

- Hirakawa et al. 2022 Hirakawa M, Nakatake H, Tsuruta S, Matsuura S, Motomura Y, Hiraki Y, Mimori K, Ishigami K. Dosimetry of Occupational Eye Lens Dose Using a Novel Direct Eye Dosimeter, DOSIRIS, during Interventional Radiology Procedures. *Interv Radiol (Higashimatsuyama)*. 2022 Jul 1;7(2):40-3, doi: 10.22575/interventionalradiology.2022-0005, Epub 20220701
- Hoedlmoser et al. 2020 Hoedlmoser H, Bandalo V, Figel M. BeOSL doseimeters and new ICRU operational quantities: Response of existing doseimeters and modification options. *Radiat. Meas.* 2020;139, doi: 10.1016/j.radmeas.2020.106482
- IAEA 2012 International Atomic Energy Agency (IAEA). Communication with the public in a nuclear or radiological emergency. EPR Public Communications. Wien. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR-Communcation_web.pdf, zuletzt aufgerufen am 10.07.2018
- ICRP 1997 International Commission on Radiological Protection (ICRP). General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27 (1), Pergamon, Oxford, 1997
- ICRP 2007 International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP 37(2-4):1-332, Elsevier, Oxford, 2007, ISBN 9780702030482, doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003
- ICRP 2009 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Realistic reference phantoms: an ICRP/ICRU joint effort. A report of adult reference computational phantoms, ICRP Publication 110. Ann ICRP 39:1-164, 2009, ISBN 1872-969X (Electronic), 0146-6453 (Linking), doi: 10.1016/j.icrp.2009.09.001
- ICRP 2010 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. Ann ICRP 40(2-5):1-257, Elsevier, Oxford, 2010, ISBN 9781455728589, doi: 10.1016/j.icrp.2011.10.001
- ICRP 2012 International Commission on Radiological Protection (ICRP). ICRP statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs -Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann ICRP 41(1-2):1-322, Elsevier, Oxford, 2012, ISBN 9780702052279, doi: 10.1016/j.icrp.2012.02.001

ICRP 2020a	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Paediatric Computational Reference Phantoms. ICRP Publication 143. Ann. ICRP 49(1), Sage Publishing, London, 2020a, ISBN 9781529741230
ICRP 2020b	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Adult Mesh-type Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 145. Ann. ICRP 49(3), Sage Publishing, London, 2020b, ISBN 9781529742213
ICRP 2021a	International Commission on Radiological Protection (ICRP), (ICRP). The Future of Radiological Protection. Personal Online Dosimetry Using Computational Methods: The PODIUM Project and the Future of Active Dosimetry. Author: Filip Vanhavere. https://icrp.org/page.asp?id=547 , zuletzt aufgerufen am 19.05.2026
ICRP 2021b	(ICRP). Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. 50(1), 2021b
ICRP 2023	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Task Group 128 - Individualisation and Stratification in Radiological Protection: Implications and Areas of Application. https://www.icrp.org/icrp_group.asp?id=204 , zuletzt aufgerufen am 19.05.2026
ICRU 1980	International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Radiation Quantities and Units. ICRU Report 33. Journal of the ICRU os-17, 1980
ICRU 1993	International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. Journal of the ICRU os-26, 1993
ICRU 1998	International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRU Report 57. Oxford University Press, Oxford, 1998
ICRU 2020	ICRU. Operational Quantities for External Radiation Exposure. ICRU Report 95. Journal of the ICRU. 2020;20(1)
IEC 60846-1: 2009	International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60846-1: 2009. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors.

IEC 60846-2: 2015	International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60846-2: 2015. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 2: High range beta and photon dose and dose rate portable instruments for emergency radiation protection purposes.
IEC 61005:2014	International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61005:2014. Radiation protection instrumentation - Neutron ambient dose equivalent (rate) meters.
ISO 4037-1:2019-01	International Organization for Standardization. ISO 4037-1:2019-01. Strahlenschutz - Röntgen- und Gamma-Referenzstrahlungsfelder zur Kalibrierung von Dosimetern und Dosisleistungsmessgeräten und zur Bestimmung ihres Ansprechvermögens als Funktion der Photonenenergie - Teil 1: Strahlungseigenschaften und Erzeugungsmethoden
ISO 21909-1:2021	International Organization for Standardization (ISO). ISO 21909-1:2021. Passive neutron dosimetry systems. Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry.
ISO 21909-2:2021	International Organization for Standardization (ISO). ISO 21909-2:2021. Passive neutron dosimetry systems. Part 2: Methodology and criteria for the qualification of personal dosimetry systems in workplaces.
Kelaranta et al. 2016	Kelaranta A, Toroi P, Vock P. Incident air kerma to absorbed organ dose conversion factors for breast and lung in PA thorax radiography: The effect of patient thickness and radiation quality. Phys Med. 2016 Dec;32(12):1594-601, doi: 10.1016/j.ejmp.2016.11.113, Epub 20161130
Kemerink et al. 2012	Kemerink GJ, Vanhavere F, Barth I, Mottaghy FM. Extremity doses of nuclear medicine personnel: a concern. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2012 Mar;39(3):529-32, doi: 10.1007/s00259-011-1973-z
Kollaard et al. 2021	Kollaard R, Zorz A, Dabin J, Covens P, Cooke J, Crabbé M, Cunha L, Dowling A, Ginjaume M, McNamara L. Review of extremity dosimetry in nuclear medicine. J Radiol Prot. 2021 Dec 6;41(4), doi: 10.1088/1361-6498/ac31a2, Epub 20211206
Lee et al. 2024	Lee Y, Choi JW, Braunstein L, Lee C, Yeom YS. Investigation on Individual Variation of Organ Doses for Photon External Exposures: A Monte Carlo Simulation Study. Journal of Radiation Protection and Research. 2024;49(1):50-64, doi: 10.14407/jrpr.2023.00661
Lewin 1947	Lewin K. Frontiers in Group Dynamics. Human Relations. 1947;1(1):5-41, doi: 10.1177/001872674700100103

- McKeever et al. 1995 McKeever S, Moscovitch M, Townsend P. Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses. Nuclear Technology Publishing, 1995, ISBN 187096191
- MessRL 2001 Richtlinie über Anforderungen an Personendosismessstellen nach Strahlenschutz- und Röntgenverordnung vom 10. Dezember 2001 (GMBL 2002, Nr. 6, S. 136)
- Otto 2019 Otto T. Response of photon dosimeters and survey instruments to new operational quantities proposed by ICRU RC26. J Instrum. 2019;14(01):P01010-P, doi: 10.1088/1748-0221/14/01/p01010
- Otto et al. 2026 Otto T, Bochud F, Olko P, Rühm W. Five Years of ICRU Report 95 - Controversial Issue and their Solutions. Journal of Radiological Protection. 2026;submitted
- Pathan et al. 2025 Pathan MS, Pradhan SM, Selvam TP, Sapra BK. A systematic approach for estimating ICRU Report 95 operational quantities for personnel monitoring using a 3-element TLD badge system. J Radiol Prot. 2025 Apr 15;45(2), doi: 10.1088/1361-6498/adc939, Epub 20250415
- PTB 2013 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). PTB-Anforderungen PTB-A 23.3 "Strahlenschutzmessgeräte; Ortsdosimeter zur Messung der Umgebungs- und Richtungs-Äquivalentdosis und der Umgebungs- und Richtungs-Äquivalentdosisleistung". Ausgabe November 2013. <https://oar.ptb.de/resources/show/-10.7795/510.20151109P>, zuletzt aufgerufen am 17.11.2023
- Rindhatayathon et al. 2025 Rindhatayathon P, Sukyaprot K, Sudchai W, Sang-Ondee P, Theirrattanakul S, Rungseesumran T, Pungkun V. Machine learning approaches for improving dosimeter reading accuracy conform with new operational quantities recommended by the ICRU 95. Appl Radiat Isot. 2025 Nov;225:112013, doi: 10.1016/j.apradiso.2025.112013, Epub 20250627
- Sans Merce et al. 2011 Sans Merce M, Ruiz N, Barth I, Carnicer A, Donadille L, Ferrari P, Fulop M, Ginjaume M, Gualdrini G, Krim S, Mariotti F, Ortega X, Rimpler A, Vanhavere F, Baechler S. Extremity exposure in nuclear medicine: preliminary results of a European study. Radiat Prot Dosimetry. 2011 Mar;144(1-4):515-20, doi: 10.1093/rpd/ncq574, Epub 20110112
- Slovic et al. 2004 Slovic P, Finucane ML, Peters E, MacGregor DG. Risk as Analysis and Risk as Feelings: Some Thoughts about Affect, Reason, Risk, and Rationality. Risk Anal. 2004 2004/04/01; 24(2):311-22, doi: <https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00433.x>

- SSK 2016 Strahlenschutzkommission (SSK). Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körper-Äquivalentdosen bei äußerer Strahlenexposition, verabschiedet in der 286. Sitzung der SSK am 01./02.12.2016. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 43, 3., überarbeitete Auflage und erweiterte Auflage, Schnelle Verlag, Berlin, 2017, ISBN 978-3-943422-43-6
- SSK 2018 Strahlenschutzkommission (SSK). Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, verabschiedet im Umlaufverfahren am 7. September 2018. Bekanntmachung im BAnz AT 14.11.2019 B5
- StrlSchG 2017 Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist"
- Zankl 1999 Zankl M. Personal dose equivalent for photons and its variation with dosimeter position. Health Phys. 1999 Feb;76(2):162-70, doi: 10.1097/00004032-199902000-00008, Epub 1999/02/03

Abkürzungsverzeichnis

BeO	Berylliumoxid
BeOSL	BeO-Dosimeter der Messstelle Mirion München
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
EURADOS	European Radiation Dosimetry Group e. V. (Verbund europäischer (Forschungs-)Einrichtungen zwecks allgemeinen Austausches und gemeinsamer Forschung, https://eurados.sckcen.be/en)
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
ICRP	International Commission on Radiological Protection (Internationale Strahlenschutzkommission)
ICRU	International Commission on Radiation Units & Measurements (Internationale Kommission für Strahlungseinheiten und Messungen)
OSL	Optisch Stimulierte Lumineszenz
SEG	Sekundärelektronengleichgewicht
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchG	Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz)
TLD	Thermolumineszenz-Dosimeter
TLD-100	TLD-Material (LiF) mit natürlicher Isotopenverteilung von Li-6 und Li-7
TLD-100H	TLD-Material (LiF) mit natürlicher Isotopenverteilung von Li-6 und Li-7 mit besonders hoher Empfindlichkeit.
TL-DOS	TLD-Dosimeter der Messstelle MPA Dortmund

Begriffserklärungen

normal: Neue Begriffe, noch nicht durch AG83 geprüft

ausgegraut, geprüfte Begriffe des Glossars

Effektive Dosis Die effektive Dosis ist die Summe der mit den zugehörigen, von der ICRP empfohlenen und in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T multiplizierten Organ-Äquivalentdosen H_T in relevanten Organen und Geweben:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

H_T ist die Organ-Äquivalentdosis in einem Gewebe oder Organ T ; w_T ist der Gewebe-Wichtungsfaktor, w_R der Strahlungs-Wichtungsfaktor. Die Einheit der effektiven Dosis ist J kg^{-1} . Um deutlich zu machen, dass es sich um eine gewichtete Dosisgröße handelt, wird wie bei der Äquivalentdosis anstelle von Gray (Gy) die Einheit Sievert (Sv), verwendet.

Energiedosis Die Energiedosis ist der Differentialquotient $d\bar{\epsilon}$ durch dm ; dabei ist $d\bar{\epsilon}$ die mittlere Energie, die durch Wechselwirkung ionisierender Strahlung auf das Material in einem Volumenelement dV übertragen wird, und $dm = \rho dV$ die Masse des Materials mit der Dichte ρ in diesem Volumenelement:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\bar{\epsilon}}{dV}$$

Die Einheit der Energiedosis ist J kg^{-1} , ihr Name ist Gray (Gy).

Die Angabe einer Energiedosis schließt die Nennung des Bezugsmaterials, das heißt des Materials von dm , ein. Beispiele: Wasser-Energiedosis D_w , Luft-Energiedosis D_a .

Gewebe-Wichtungsfaktor Die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T beschreiben näherungsweise den Anteil des Strahlenrisikos, der sich bei homogener Ganzkörperbestrahlung aus der Bestrahlung eines Gewebes oder Organs T für das Gesamtrisiko ergibt. Die Gewebe-Wichtungsfaktoren stellen Mittelwerte dar, gemittelt über Menschen beider Geschlechter und aller Altersgruppen, und beziehen sich somit nicht auf die Eigenschaften einzelner Personen. Durch die Gewebe-Wichtungsfaktoren werden die einzelnen Organ-Äquivalentdosen H_T zur Berechnung der effektiven Dosis E gewichtet. Diese Faktoren w_T spiegeln die unterschiedliche Empfindlichkeit der verschiedenen Organe, Gewebe und Körperteile T gegenüber stochastischen Strahlenwirkungen (Krebsinduktion, Auslösung von Erbschäden) wider.

Kerma Kerma (Kinetic Energy released in matter oder Kinetic Energy released per unit mass) bezeichnet die Summe der kinetischen Anfangsenergien aller Sekundärelektronen, die im bestrahlten Medium in einem Volumenelement freigesetzt werden. Es ist eine vom bestrahlten Medium abhän-

gige physikalische Größe. Im Gegensatz zur Energiedosis, die für die vom Material aufgenommene Energie definiert ist, bezieht sich die Kerma auf die dort abgegebene Energie.

In Folge der Wechselwirkung von indirekt ionisierender Strahlung mit einem Medium werden geladene Teilchen (Sekundärelektronen) ausgelöst. Sekundärelektronen geben ihre Energie an Atome und Moleküle des Materials ab. Bei Dosismessungen wird nur die Energie erfasst, die im Messvolumen wirksam ist. Sekundärelektronengleichgewicht bezeichnet den Zustand, wenn die Teilbeträge der Elektronenenergien, die außerhalb des Messvolumens abgegeben werden, gleich denen sind, die von Elektronen aus der Umgebung in das Messvolumen eingebracht werden.

Im Fall des Sekundärelektronengleichgewichtes ist der Wert für die Kerma annähernd gleich dem der Energiedosis. Der Name der Einheit der Kerma ist Gray (Gy).

Kontrollbereich	Kontrollbereiche sind Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 6 Millisievert oder höhere Organ-Äquivalentdosen als 15 Millisievert für die Augenlinse oder 150 Millisievert für die lokale Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können. (Aus: Koelzer, W. Lexikon zur Kernenergie. Ausgabe Januar 2019. KIT Scientific Publishing. ISBN 978-3-7315-0881-6
Konversionskoeffizienten	Konversionskoeffizienten bezeichnen im praktischen Strahlenschutz das Verhältnis zwischen direkt messbaren Größen (z. B. Luftkerma) und nicht direkt messbaren Größen (z. B. $H^*(10)$).
Luftkerma	Im Fall von Luftkerma wird Luft als bestrahltes Medium betrachtet. Die Einheit der Luftkerma ist Gray (Gy).
Meshphantom	Computergestütztes Referenz-Computer-Phantom (MRCP), das auf polygonalen Netzen beruht, mit denen sich anatomische Strukturen im Vergleich zu Voxelpantomen genauer darstellen lassen.
Organ-Äquivalentdosis	Die Organ-Äquivalentdosis H_T ist das Produkt aus der mittleren Energiedosis $D_{T,R}$ in einem Organ oder Gewebe und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R nach ICRP. Die Werte des Strahlungs-Wichtungsfaktors w_R nach ICRP richten sich nach Art und Qualität der Strahlung (Photonen, Elektronen, Neutronen, Protonen, Alpha-Teilchen).
Personendosis	Die Personendosis ist die Mess-Äquivalentdosis, gemessen an der für die Strahlenexposition repräsentativen Stelle der Körperoberfläche. Die Einheit der Personendosis ($H_p(d)$) ist $J\ kg^{-1}$, ihr Name ist Sievert (Sv). Es gibt verschiedene Größen, die die Personendosis beschreiben: die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$, Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$ und Augenlinsen-Personendosis $H_p(3)$. Der Messwert der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ - geeignete Bauart, Kalibrierung sowie richtige Trageweise eines Personendosimeters vorausgesetzt – stellt bei Exposition des ganzen Körpers mit durchdringender Strahlung einen Schätzwert für die effektive Dosis und die Organ-Äquivalentdosen tiefliegender Organe, in

	Spezialfällen auch für die Organ-Äquivalentdosen der Hände, Unterarme, Füße und Knöchel dar. Der Messwert der Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$ ist bei Ganz- oder Teilkörperexposition ein Schätzwert für die lokale Haut-Äquivalentdosis, in Spezialfällen auch für die Organ-Äquivalentdosen der Hände, Unterarme, Füße und Knöchel. Der Messwert der Augenlinsen-Personendosis $H_p(3)$ liefert einen Schätzwert für die Augenlinsen-Äquivalentdosis. Die wichtigste Voraussetzung für die Möglichkeit solcher Dosisabschätzungen ist die korrekte Trageweise des verwendeten Personendosimeters.
Sekundärelektronengleichgewicht	Ein Sekundärelektronengleichgewicht besteht an einem Punkt innerhalb eines Materials, wenn die Summe der kinetischen Energien der von einer indirekt ionisierenden Strahlung erzeugten Sekundärelektronen, die in ein Volumenelement eintreten, das diesen Punkt enthält, gleich der Summe der kinetischen Energien der Sekundärelektronen, die aus diesem Volumenelement heraustreten, ist. Für Strahlungen indirekt ionisierender Teilchen spielt der Zustand des Sekundärelektronengleichgewichts bei der Ermittlung der Energiedosis eine wichtige Rolle. Sekundärelektronengleichgewicht kann bei gerichteten Strahlenbündeln, wie sie beim Umgang mit Strahlenquellen oft auftreten, nur näherungsweise erreicht werden (https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/strlsch_messungen_glossar.pdf)
Strahlungs-Wichtungsfaktor	Der Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R ist ein dimensionsloser Faktor, mit dem die Energiedosis im Organ oder im Gewebe multipliziert wird, um die unterschiedliche biologische Wirksamkeit von verschiedenen Strahlungsarten zu berücksichtigen.
Teilchenfluenz	Teilchenfluenz beschreibt die Anzahl der Teilchen, die ein Flächenelement der infinitesimalen Einheitskugel aus einer beliebigen Richtung durchsetzen. Die Einheit der Teilchenfluenz ist m^{-2}.
Voxelphantom (Referenzphantom)	Computergestütztes anthropomorphes Phantom basierend auf tomografischen Bildern, bei denen die Anatomie durch kleine dreidimensionale Volumenelemente (Voxel) beschrieben wird, die die Dichte und die atomare Zusammensetzung der verschiedenen Organe und Gewebe angeben.