



AWMF-Register Nr.	002/035	Klasse:	S1
--------------------------	----------------	----------------	-----------

Umweltmedizinische Leitlinie Radon in Innenräumen

S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin

Stoffeigenschaften:

Radon ist ein natürlich vorkommendes, radioaktives Edelgas mit der Ordnungszahl 86. Es ist geruchlos, geschmacklos, farblos und chemisch nahezu inert.

Radon findet sich in den radioaktiven Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232 und wird dort aus seinem Mutternuklid Radium gebildet. Alle Isotope des Radons sind radioaktiv. Das stabilste Isotop ist Radon-222, das mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen zu Polonium-218 zerfällt. Im Sprachgebrauch und im Rahmen dieser Leitlinie schließt die Bezeichnung „Radon“ die Radonisotope und deren kurzlebige Zerfallsprodukte ein.

Von den genannten radioaktiven Isotopen wird alpha-Strahlung emittiert, die zwar eine sehr geringe Reichweite und Eindringtiefe hat, jedoch dicht ionisiert und eine hohe relative biologische Wirksamkeit aufweist.

Expositionsquellen:

Die Quellen des Radons sind im Gestein und im Erdreich in Spuren vorhandenes Uran und Thorium. Radon kommt folglich vermehrt in Gebieten mit hohem Uran- und Thoriumgehalt im Boden vor, z.B. im Erzgebirge, aber auch im Schwarzwald, im Bayerischen Wald und im Fichtelgebirge. Es gelangt aus den oberen Bodenschichten in die Atmosphäre.

So können in der bodennahen Luft erhebliche Radonkonzentrationen auftreten, die im Freien jedoch rasch verdünnt werden. Durch Eingriffe des Menschen in die Natur (z.B. Halden des Erzbergbaus) können lokal Radon-Konzentrationen vorkommen, die über das natürliche Niveau der Region hinausgehen.

Radon kann aber auch in das Grundwasser, in Keller, Rohrleitungen, Höhlen, Bergwerke und Wasserversorgungsanlagen eindringen.

Über Undichtigkeiten in der Bodenplatte und den erdberührenden Wänden ist Radon in der Lage in Häuser einzudringen und sich dort anzureichern. In Gebäuden treten meist deutlich höhere Radonkonzentrationen als im Freien auf. In Gebäude eingedrungenes Radon kann sich über Treppenaufgänge, Kabelkanäle und Versorgungsschächte, aber auch durch Geschossdecken in höher gelegene Räume des Hauses ausbreiten.

In Baumaterialien kann, wie in Böden und Gesteinen, Radon gebildet werden, das teilweise in die Häuser freigesetzt wird. Werden Baustoffe mit höherer Radonfreisetzung verwendet, kann das erhöhte Radonkonzentrationen in den Räumen zur Folge haben. In Deutschland spielt die Belastung durch Baumaterialien jedoch eine eher geringe Rolle.

Das aus Grundwasserleitern gewonnene Trinkwasser kann in Abhängigkeit von den lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide aufweisen, die zu Strahlenexpositionen der Bevölkerung führen können, deren Höhe nicht mehr als geringfügig anzusehen ist (Strahlenschutzkommission, 2004).

In der Radonbalneologie wird eine angeblich heilende Wirkung gering dosierter Alphastrahlung durch den Radongehalt mancher Heilbäder postuliert. Die Anwendung erfolgt dabei als "Radonbäder" oder Radon-Emanationen z.B. beim Aufenthalt in „Heilstollen“.

Diese Anwendung von Radon ist nicht Gegenstand der vorliegenden Leitlinie.

Die vorliegende Leitlinie befasst sich mit Radon in Innenräumen, da diesem Expositionspfad nach dem derzeitigen Stand der Forschung eine relevante Bedeutung für die Allgemeinbevölkerung zukommt.

Höhe der Belastung:

Die Höhe der im konkreten Fall in Innenräumen auftretenden Radonkonzentration ist im Wesentlichen abhängig von

- der Beschaffenheit des Untergrundes, auf dem das Haus steht (z.B. Granitgestein)
- der Beschaffenheit der Bausubstanz (Dichtigkeit im erdberührenden Bereich)
- den Witterungsbedingungen und Druckverhältnissen.
- dem Luftaustausch und der Dichtigkeit von Fenstern und Türen.

Auch eine Abhängigkeit von der Jahreszeit wurde beschrieben, mit höheren Werten in den Herbst- und Wintermonaten (Létourneau et al., 1992). Dabei besteht die Möglichkeit derartige saisonale Einflüsse auch mittels Rechenmodellen zu berücksichtigen. (Krewski et al., 2005).

Zwar existieren Karten von Deutschland zur Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft und zu den durchschnittlichen Radon-Konzentrationen in Wohnungen in Deutschland, die dabei in Häusern und Räumen konkret auftretenden Konzentrationen sind jedoch nicht vorhersehbar und müssten in jedem Einzelfall durch Messungen bestimmt werden.

Die in verschiedenen Untersuchungen gemessenen Radonkonzentrationen überstreichen einen weiten Bereich. In einer großen Untersuchung waren die Messwerte annähernd logarithmisch normalverteilt, die geometrischen Mittelwerte nahmen von 90 Bq/m^3 für die Kellerräume über 61 Bq/m^3 (Erdgeschoss), 50 Bq/m^3 (1. Etage) bis hin zu 46 Bq/m^3 für höhere Etagen ab. (Kemski et al., 2004). In Gebieten mit höheren Radonkonzentrationen in der Bodenluft und radondurchlässigem Baugrund sind in Gebäuden häufiger erhöhte Radonkonzentrationen

anzutreffen. Jahresmittelwerte über 1000 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen sind jedoch auch dort selten (Bundesamt für Strahlenschutz, 2007).

Expositionserfassung:

Radonmessungen können mit passiven Messgeräten oder mit direkt ablesbaren elektronischen Messgeräten durchgeführt werden. Entscheidend dabei ist, dass die Messungen fachgerecht und qualitätsgesichert durchgeführt werden (Strahlenschutzkommission 2002). Messstellen, die passive Messgeräte zur Radonmessung auswerten, müssen die notwendigen Anforderungen an die Qualitätssicherung erfüllen. Diese gelten zunächst nur für Messungen, die nach Teil 3 Kapitel 2 der Strahlenschutzverordnung für die Überwachung beruflich strahlenexponierter Personen durchgeführt werden. Darüber hinaus sollten diese Kriterien auch bei Radonmessungen im häuslichen Bereich angewendet werden. Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht auf seinen Internetseiten Listen mit Messstellen, die die notwendigen Anforderungen an die Qualitätssicherung erfüllen.

Biologische Effekte beim Menschen:

Durch Inhalation von Radon kommt es lokal zu einer hohen Strahlenbelastung mit Alpha-Strahlung im Bereich der Bronchialschleimhaut. Dabei sind die Zerfallsprodukte des Radons von Bedeutung, die im Atemtrakt angelagert werden. Die dabei entstehende energiereiche Alpha-Strahlung trifft die strahlenempfindlichen Zellen des Bronchialepithels und kann dort DNA Schäden hervorrufen. Hierdurch können Tumorerkrankungen verursacht werden.

Für den Bereich der Arbeitsmedizin ist das gehäufte Auftreten von Lungenkreberkrankungen durch Radon und dessen Zerfallsprodukte seit langem unter der historischen Bezeichnung „Schneeberger-Krankheit“ bekannt. Lungenkreberkrankungen der Bergleute sind der häufigste beruflich verursachte Strahlenschaden in Deutschland (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 1998). Bei der beruflichen Exposition im

Uranerzbergbau wird nicht nur die Verursachung von Lungenkrebskrankungen, sondern auch von Leukämieerkrankungen, mit Ausnahme der chronisch-lymphatischen Leukämie, Knochenkrebs und Leberkrebs sowie anderer Tumorerkrankungen diskutiert (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 2000). Hierbei sind jedoch auch die anderen Expositionsbedingungen beim Uranbergbau unter Tage im Vergleich zur Radonexposition in Innenräumen zu berücksichtigen. Hinsichtlich der umweltmedizinischen Exposition in Innenräumen finden sich nur vereinzelt Hinweise auf andere Effekte, außerhalb von Lungenkrebskrankungen, wie kindliche Leukämien (Tong et al., 2012), Hautkrebs (Wheeler et al., 2012) und obstruktive Atemwegserkrankung (Turner et al., 2012). Gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse liegen für den umweltmedizinischen Bereich nur für Lungenkrebskrankungen vor.

Radon gilt als eine Hauptquelle der natürlichen Strahlenexposition. Im Bereich der Umweltmedizin wurde zunächst die Bedeutung der Innenraumbelastung durch Radon für die Verursachung von Lungenkrebskrankungen kontrovers diskutiert (Field et al., 2003), da die Ergebnisse einzelner Fall-Kontrollstudien widersprüchlich waren (Samet, 1997; Field et al., 2001; Field et al., 2006; Sandler et al., 2006). Zu beachten ist dabei eine korrekte messtechnische Erfassung der Radonbelastung (Steck und Field, 2006), ebenso wie eine sorgfältige Berücksichtigung des Rauchverhaltens (Heid et al., 2006). Mittels einzelner Fall-Kontroll Studien war es nicht möglich, Risiken im Niedrigdosis-Bereich valide zu detektieren. Erst mit der Realisierung von Metaanalysen kam es zu einem wesentlichen Erkenntnisgewinn (Lubin und Boice, 1997; Pavia et al., 2003). Zwischenzeitlich konnte durch die gemeinsame Auswertung vieler epidemiologischer Studien sowohl in Europa wie auch in den USA und in China übereinstimmend ein Zusammenhang zwischen der Radonexposition in Innenräumen und dem Auftreten von Lungenkrebskrankungen nachgewiesen werden.

Wesentliche Ergebnisse einer Auswertung aus 13 europäischen Fall-Kontrollstudien mit insgesamt 7148 Fällen und 14208 Kontrollen (Darby et al., 2005) sind:

- Auch nach Berücksichtigung des Rauchverhaltens gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Radonkonzentration in Innenräumen und dem Auftreten von Lungenkrebskrankungen.
- Eine Dosis-Wirkungsbeziehung wurde selbst im Bereich niedriger Dosen ($< 200 \text{ Bq/m}^3$) gefunden, ohne Hinweis darauf, dass ein Schwellenwert existiert.
- Das absolute Risiko ist für Raucher um ein vielfaches höher als für Nie-Raucher.
- Radon in Innenräumen ist die Ursache für etwa 9% aller Todesfälle an Lungenkrebs und etwa 2% aller Todesfälle an Krebs in Europa.

Die Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit einer gemeinsamen Auswertung von sieben amerikanischen Fall-Kontrollstudien mit insgesamt bis zu 4081 Fällen und 5281 Kontrollen (Krewski et al., 2005; Krewski et al., 2006), und einer gemeinsamen Auswertung zweier chinesischer Fall-Kontrollstudien mit insgesamt 1050 Fällen und 1996 Kontrollen (Lubin et al., 2004).

Auch eine aktuelle Metaanalyse von 22 Fall-Kontrollstudien mit insgesamt 13.380 Fällen und 21.102 Kontrollen bestätigte, dass Radon in der Lage ist, dosisabhängig das Lungenkrebsrisiko zu erhöhen (Zhang et al., 2012).

Die durch die gemeinsame Auswertung von Fall-Kontrollstudien gewonnenen Ergebnisse stehen dabei in Einklang sowohl mit Resultaten aus Tierversuchen und in-vitro Studien als auch mit einer Extrapolation von Daten, die bei Bergwerksarbeitern gewonnen wurden (Lubin et al., 1997, Taeger et al. 2006). Dies konnte auch aktuell bei einer Auswertung von drei Fall-Kontrollstudien bei Bergwerksarbeitern mit Expositionen unter 300 WLM (working-level-months) gezeigt werden (Hunter et al., 2013).

Auch in einer amerikanischen Kohortenstudie mit 1,2 Millionen Teilnehmern konnte ein Zusammenhang zwischen der (anhand der Postleitzahl abgeschätzten) Radonexposition und dem Auftreten von Lungenkreberkrankungen nachgewiesen werden (Turner et al., 2011).

Die deutsche Strahlenschutzkommission hat das Lungenkrebsrisiko durch Radon bestätigt (Strahlenschutzkommission, 2008), ebenso die WHO (WHO, 2009) und die International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 115, 2010). Alle derzeit vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse sprechen für ein lineares Dosis-Wirkungsmodell ohne Schwellenwert (Samet, 2006).

Risiko:

Anhand der Ergebnisse der Europäischen Pooling-Studie zum Lungenkrebsrisiko durch Radon konnte gezeigt werden, dass pro 100 Bq/m³ gemessener langzeitiger Radonexposition von einem Anstieg des relativen Risikos um 8,4% (95% Konfidenzintervall: 3,0% - 15,8%) ohne Korrektur und von 16% (95% Konfidenzintervall: 5% - 31%) nach Korrektur für Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung ausgegangen werden kann (Darby, 2005). Der Anteil der durch Radon verursachten Lungenkreberkrankungen liegt weltweit zwischen 3% und 14% (WHO, 2009). Für Deutschland wurde davon ausgegangen, dass bei einer durchschnittlichen Radonkonzentration in Innenräumen von 49 Bq pro Kubikmeter 5% der Lungenkreberkrankungen auf diese Einwirkung zurückgeführt werden können und der Tod von 1422 Männer und 474 Frauen jährlich verursacht wird (Menzler et al., 2008). Nach dem Zigarettenrauchen ist die Radonexposition in Innenräumen die zweithäufigste Ursache für Lungenkreberkrankungen. Bei Nie-Rauchern ist Radon die häufigste Ursache für Lungenkreberkrankungen. Die gesundheitliche Relevanz anderer umweltbedingter Noxen wie z.B. Asbest oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wird deutlich geringer eingeschätzt (Strahlenschutzkommission, 2008).

Referenzwerte:

Die vorliegenden Daten erlauben es nicht, einen Grenzwert festzusetzen, bei dessen Einhaltung ein Risiko ausgeschlossen werden kann (WHO, 2009). Da Radon in allen Gebäuden vorkommt, stellt es ein wichtiges Gesundheitsproblem dar. Deshalb ist es erforderlich, die Radonkonzentrationen in Räumen, in denen sich Personen nicht nur vorübergehend aufhalten, so niedrig wie möglich zu halten. Die aktuelle EU Richtlinie schreibt vor, dass die Mitgliedstaaten nationale Referenzwerte für die Radonkonzentration in Innenräumen festlegen. Der Referenzwert für die Aktivitätskonzentration in der Luft im Jahresmittel darf dabei 300 Bq/m^3 nicht überschreiten (Der Rat der Europäischen Union, 2014). Die EU-Richtlinie zu Radon trat am 17. Januar 2014 in Kraft. Die Mitgliedsstaaten sind jetzt gehalten, diese Vorgaben bis spätestens 6. Februar 2018 in nationales Recht umzusetzen.

Aufgrund der neuesten Studienergebnisse und unter Berücksichtigung der WHO Empfehlungen aus dem Jahre 2009 (World Health Organization, 2009) wird empfohlen, bei neu zu errichtenden Gebäuden einen Planungswert von $<100 \text{ Bq/m}^3$ zugrunde zu legen und bei Altbauten anzustreben (Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit). Ein in Deutschland geplantes Radonschutzgesetz mit Regelungen zu Grenzwerten und Sanierungszeiten konnte jedoch bis heute nicht verabschiedet werden.

Maßnahmen zur Risikokommunikation und Risikominimierung:

Über die Bedeutung der Radonexposition in Innenräumen für die Entstehung von Lungenkreberkrankungen und über die Notwendigkeit einer Intervention durch geeignete Messprogramme und sinnvolle Maßnahmen zur Verminderung der Radonexposition besteht zwischenzeitlich weltweiter Konsens (Zielinski et al., 2006).

Neben der ethischen Verpflichtung einen als relevant erkannten Risikofaktor zu minimieren konnte zusätzlich belegt werden, dass Maßnahmen zur Expositionsminderung auch unter Kosten-Nutzen Gesichtspunkten sinnvoll sein können (Stigum et al., 2003). Haucke konnte 2010 in einer Kosten-Nutzen Analyse für Deutschland zeigen, dass die Einführung eines Grenzwertes von 100 Bq/m^3 mit der Verpflichtung zur Sanierung auch bestehender Gebäude effektiv ist (Haucke, 2010). Es wurde angenommen, dass durch eine Absenkung des Höchstwertes für die Radonkonzentration in Wohnungen auf 100 Bq/m^3 ca. 300 Lungenkrebstodesfälle pro Jahr in Deutschland verhindert werden könnten (Strahlenschutzkommission, 2008).

In der Bevölkerung, in der Politik aber auch bei Fachleuten, wie Ärztinnen und Ärzten, Umweltverbänden, Architekten, Baubiologen, Baufachleuten und Verbraucherberatungen bestehen erhebliche Wissensdefizite hinsichtlich des Lungenkrebsrisikos durch Radon in Innenräumen. Maßnahmen zur Information und Aufklärung sind deshalb ebenso erforderlich wie Regelungen zu verpflichtenden Messungen und der Einhaltung von Grenzwerten. Zum Schutz vor erhöhten Radonkonzentrationen gibt es sowohl für neu zu errichtende Gebäude als auch für den Gebäudebestand erprobte Maßnahmen, die das Bundesamt für Strahlenschutz im Radon-Handbuch Deutschland zusammengestellt hat (Bundesamt für Strahlenschutz, 2001).

Auch die EU Richtlinie aus dem Jahre 2014 sieht vor, dass die Mitgliedstaaten dafür sorgen, dass lokale und nationale Informationen über die Radonexposition in Innenräumen und die damit verbundenen Gesundheitsrisiken, über die Wichtigkeit der Durchführung von Radonmessungen und über die zur Verringerung vorhandener Radonkonzentrationen verfügbaren technischen Mittel bereitgestellt werden. Im Rahmen des nationalen Maßnahmenplans fördern die Mitgliedstaaten Maßnahmen zur Ermittlung von Wohnräumen, in denen die Radonkonzentration (im Jahresmittel) den Referenzwert überschreitet, und regen gegebenenfalls Maßnahmen zur Verringerung der Radonkonzentration in diesen

Wohnräumen durch technische oder andere Mittel an (Der Rat der Europäischen Union, 2014).

Schlussfolgerungen:

Die Exposition gegenüber Radon und seinen Zerfallsprodukten in Innenräumen liefert einen wesentlichen Beitrag zur Strahlenexposition der Allgemeinbevölkerung. Radon zählt dabei zu den am besten untersuchten Kanzerogenen in der Umwelt. Es ist in der wissenschaftlichen Literatur gut belegt, dass durch Radon in Innenräumen das Risiko an Lungenkrebs zu erkranken relevant erhöht wird im Sinne einer linearen Dosis-Wirkungs- Beziehung ohne Schwellenwert. Neben dem Aktivrauchen gilt Radon als zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebserkrankungen in der beruflich nicht exponierten Allgemeinbevölkerung und ist damit quantitativ für das Lungenkrebsrisiko noch bedeutsamer als die Belastung durch Passivrauch. Bei der Identifikation von Gebäuden mit hoher Radonbelastung und der Einleitung geeigneter Maßnahmen handelt es sich um wichtige präventive Maßnahmen. Aktuelle Informationen zu diesen Maßnahmen finden sich auf den entsprechenden Seiten des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Literatur:

1. Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit: Vermeidung und Verminderung der Radonbelastung von Innenräumen: <http://www.apug.de/>
2. Bundesamt für Strahlenschutz: Radon-Handbuch Deutschland. Wirtschaftsverlag NW - Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven 2001.
3. Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlenthemen: Radon in Häusern; 2012, unter: http://www.bfs.de/de/bfs/publikationen/broschueren/ionisierende_strahlung/radon/stth_radon.pdf
4. Bundesamt für Strahlenschutz, Internetseiten zu Baumaßnahmen gegen Radon: http://www.bfs.de/de/ion/anthropg/radon/massnahmen_radon.html (Stand 18.06.2014)
5. Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios J M, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Mäkeläinen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenoja E, Schaffrath Rosario A, Tirmarche M, Tomasek L, Whitley E, Wichmann H-E, Doll R: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 2005; 330:223-229.
6. Der Rat der Europäischen Union: RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES 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 vom 17.01.2014. L13/1.
7. Field R W, Steck DJ, Smith B J, Brus C P, Fisher E F, Neuberger J S, Lynch C F: The Iowa radon lung cancer study – phase I: residential radon gas exposure and lung cancer. *The Science of the Total Environment* 2001; 272: 67-72.
8. Field RW, Duport PJ, Hendee WR: Exposure to residential radon causes lung cancer. *Med. Phys.* 2003; 30:485-488.
9. Field R W, Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, Alavanja M, Catalan V S, Klotz J B, Lètourneau E G, Lynch C F, Lyon J L, Sandler D P, Schoenberg J B, Steck D J, Stolwijk J A, Weinberg C, Wilcox H B: An Overview of the North American Residential Radon and Lung Cancer Case-Control Studies. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 599-631.
10. Haucke F. The cost effectiveness of radon mitigation in existing German dwellings – A decision theoretic analysis. *Journal of Environmental Management* 2010;91:2263-2274.
11. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und Bergbau Berufsgenossenschaft. (Hrsg.): Belastung durch ionisierende Strahlung im Uranerzbergbau der ehemaligen DDR, Abschlußbericht zu einem Forschungsvorhaben, Sankt Augustin 1998.
12. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.): BK-Report Berufskrankheiten-Forum Berichtsband über das Fachgespräch Extrapulmonale Krebserkrankungen Wismut am 12. Februar 1998 in Hennef, Sankt Augustin 2000.
13. Heid I M, Küchenhoff H, Schaffrath Rosario A, Kreienbrock L, Wichmann H.-E.: Impact of Measurement Error in Exposures in German Radon Studies. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 701-721.
14. Hunter N, Muirhead C R, Tomasek L, Kreuzer M, Laurier D, Leraud K, Schnelzer M, Grosche B, Placek V, Heribanova A, Tirmarche M. Joint Analysis of three European nested Case-Control Studies of Lung Cancer among Radon exposed Miners: Exposure restricted to below 300 WLM. *Health Physics* 2013;104(3):282-292.

15. ICRP Publication 115. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. *Annals of the ICRP* 2010; 40(1):1-64.
16. Kemski J, Klingel R, Stegemann R: Validierung der regionalen Verteilung der Radonkonzentration in Häusern mittels Radonmessungen unter Berücksichtigung der Bauweise. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2004. verfügbar unter: http://www.apug.de/archiv/pdf/BMU_Radonsicherheit.pdf
17. Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, Alavanja M, Catalan V S, Field R W, Klotz J B, Letourneau E G, Lynch C F, Lyon J I, Sandler D P, Schoenberg J B, Steck D J, Stolwijk J A, Weinberg C, Wilcox H B: Residential Radon and Risk of Lung Cancer, A Combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies. *Epidemiology* 2005; 16: 137-145.
18. Krewski D, Mallick R, Zielinski J M, Létourneau E G: Modeling seasonal variation in indoor radon concentrations. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2005; 15: 234-243
19. Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, Alavanja M, Catalan V S, Field R W, Klotz J B, Létourneau E G, Lynch C F, Lyon J L, Sandler D P, Schoenberg J B, Steck D J, Stolwijk J A, Weinberg C, Wilcox H B: A Combined Analysis of North American Case-Control Studies of Residential Radon and Lung Cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006, 69:533-597.
20. Létourneau EG, Zielinski JM, Krewski D, Mc Gregor RG. Levels of radon gas in Winnipeg homes. *Radiation Protection Dosimetry* 1992;45:531-534.
21. Lubin J Hm, Boice J D, Jr: Lung Cancer Risk From Residential Radon: Meta-analysis of Eight Epidemiologic Studies. *Journal of the National Cancer Institute* 1997; 89:49-57.
22. Lubin J H, Tomasek L, Edling C, Hornung R W, Howe G, Kunz E Kusiak R A, Morrison HI, Radford E P, Samet J M, Tirmarche M, Woodward A, Yao S. X: Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat. Res.* 1997;147:126–134.
23. Lubin J H, Wang Z Y, Boice J D, Xu Z Y, Blot W J, De Wang L, Kleinerman R A: Risk of lung cancer and residential radon in China: Pooled results of two studies. *Int. J. Cancer.* 2004 109:132–137.
24. Menzler S, Piller G, Gruson M, Schaffrath Rosario A, Wichmann H E, Kreienbrock L. Population attributable fraction for lung cancer due to residential radon in Switzerland and Germany. *Health Physics* 2008;95(2):179-189.
25. Pavia M, Bianco A, Pileggi C, Angelillo I F: Meta-analysis of residential exposure to radon gas and lung cancer. *Bulletin of the World Health Organization* 2003; 81: 732-738.
26. Samet J M: Indoor Radon Exposure and Lung Cancer: Risky or Not? – All Over Again. *Journal of the National Cancer Institute* 1997; 89: 4-6
27. Samet J M: Residential Radon and Lung Cancer: End of the Story? *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 527-531
28. Sandler D P, Weinberg C R, Shore D L, Archer V E, Bishop Stone M, Lyon J L, Rothney-Kozlak L, Shepherd M, Stolwijk J A J: Indoor Radon and Lung Cancer Risk in Connecticut and Utah. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 633-654.
29. Steck D J, Field R W: Dosimetric Challenges for Residential Radon Epidemiology. *Journal of Toxicology an Environmental Health, Part A* 2006; 69: 655-664.
30. Stigum H, Strand T, Magnus P: Should Radon Be Reduced In Homes? A Cost-Effekt Analysis. *Health Physics* 2003; 84: 227-235.

31. Strahlenschutzkommission Veröffentlichungen: Band 47 Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten Redaktion: Olaf Sarenio, Bonn 2002, ISBN 3-437-21478-0.
32. Strahlenschutzkommission Stellungnahme: Strahlenexposition durch Radon-222 im Trinkwasser. Vom 3. August 2004. BAnz. 159 vom 25.08.2004 S. 18957.
33. Strahlenschutzkommission Veröffentlichung Band 62. Einfluss der natürlichen Strahlenexposition auf die Krebsentstehung in Deutschland – Stellungnahme der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. Verlag H. Hoffmann Berlin 2008. ISBN 978-3-87344-144-6.
34. Taeger D, Fritsch A, Wiethage T, Johnen G, Eisenmenger A, Wesch H, Ko Y, Stier S, Michael Muller K, Bruning T, Pesch B: Role of exposure to radon and silicosis on the cell type of lung carcinoma in German uranium miners. *Cancer*. 2006; 106: 881-889.
35. Tong J, Qin L, Cao Y, Li J, Zhang J, Nie J, An Y. Environmental Radon Exposure and Childhood Leukemia. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 2012; 15:332-347.
36. Turner MC, Krewski D, Chen Y, Pope III C A, Gapstur S, Thun M J. Radon and Lung Cancer in the American Cancer Society Cohort. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention* 2011;20(3):438-448.
37. Turner M C, Krewski D, Chen Y, Pope III C A, Gapstur S M, Thun M J. Radon and Nonrespiratory Mortality in the American Cancer Society Cohort. *American Journal of Epidemiology* 2012;176(9):808-814.
38. Wheeler B W, Allen J, Depledge M H, Curnow A. Radon and Skin Cancer in Southwest England – An Ecologic Study. *Epidemiology* 2012;23:44-52.
39. World Health Organization. WHO Handbook on indoor Radon – A public health perspective. WHO Press, World Health Organization 2009. ISBN 978 92 4 154767 3
40. Zhang Z L, Sun J, Dong J Y, Tian H L, Xue L, Qin L Q, Tong J: Residential Radon and Lung Cancer Risk: An Updated Metaanalysis of Case-control Studies. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention* 2012; 13:2459-2465.
41. Zielinsky J M, Carr Z, Krewski D, Repacholi M: World Health Organization's International Radon Project. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69:759-769.

Erarbeitet von:

Prof. Dr. med. Klaus Schmid, Prof. Dr. med. Torsten Kuwert, Prof. Dr. med. Hans Drexler, Erlangen (2016)

Verabschiedet vom Vorstand der DGAUM am 15.6.2016

(frühere Version der Leitlinie erarbeitet von: K. Schmid, Erlangen (2007), diskutiert in der AG Klinische Umweltmedizin der DGAUM, verabschiedet vom Vorstand der DGAUM: November 2008)

Erstellungsdatum: 11/2008

Überarbeitung von: 06/2016

Nächste Überprüfung geplant: 06/2021

Die "Leitlinien" der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften sind systematisch entwickelte Hilfen für Ärzte zur Entscheidungsfindung in spezifischen Situationen. Sie beruhen auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und in der Praxis bewährten Verfahren und sorgen für mehr Sicherheit in der Medizin, sollen aber auch ökonomische Aspekte berücksichtigen. Die "Leitlinien" sind für Ärzte rechtlich nicht bindend und haben daher weder haftungsbegründende noch haftungsbefreiende Wirkung.

Die AWMF erfasst und publiziert die Leitlinien der Fachgesellschaften mit größtmöglicher Sorgfalt - dennoch kann die AWMF für die Richtigkeit des Inhalts keine Verantwortung übernehmen. **Insbesondere bei Dosierungsangaben sind stets die Angaben der Hersteller zu beachten!**

© Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin
Autorisiert für elektronische Publikation: AWMF online