

## ÜBERSICHTSARBEIT

# Radon in Innenräumen

Ein in der umweltmedizinischen Diskussion unterschätzter Risikofaktor für Lungenkrebs

Klaus Schmid, Torsten Kuwert, Hans Drexler

## ZUSAMMENFASSUNG

**Hintergrund:** In der Arbeitsmedizin ist Radon – insbesondere bei Tätigkeiten unter Tage – als Verursacher von Lungenkrebskrankungen bekannt. Zum Risiko der Allgemeinbevölkerung durch Radon in Innenräumen, gab es bis vor kurzem wenig gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse.

**Methoden:** Die Autoren analysierten selektiv recherchierte Literatur und berücksichtigten in ihrer Auswertung eine kürzlich publizierte S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin und eine aktuelle Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission.

**Ergebnisse:** Die Exposition gegenüber Radon und seinen Zerfallsprodukten in Innenräumen trägt wesentlich zur Strahlenbelastung der Allgemeinbevölkerung bei. Für Deutschland kann man in Wohnzimmern und Schlafzimmern im Mittel von einer Belastung in Höhe von  $49 \text{ Bq/m}^3$  ausgehen. Es ist in der wissenschaftlichen Literatur gut belegt, dass durch Radon in Innenräumen das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken, relevant erhöht wird, und zwar am ehesten im Sinne einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert. Pro  $100 \text{ Bq/m}^3$  zusätzlicher Radonexposition kann man einen Anstieg des relativen Risikos in einem Bereich von 8 bis 16 % annehmen. Neben dem Zigarettenrauchen gilt Radon als zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebskrankungen in der beruflich nichtexponierten Allgemeinbevölkerung.

**Schlussfolgerung:** Zur Prävention ist es aus umweltmedizinischer Sicht wichtig, Gebäude mit hoher Radonbelastung zu identifizieren, geeignete Maßnahmen einzuleiten und die Radonbelastung insbesondere in Neubauten zu minimieren.

**Zitierweise:** Dtsch Arztebl Int 2010; 107(11): 181–6  
**DOI:** 10.3238/arztebl.2010.0181

Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg: PD Dr. med. Schmid, Prof. Dr. med. Drexler

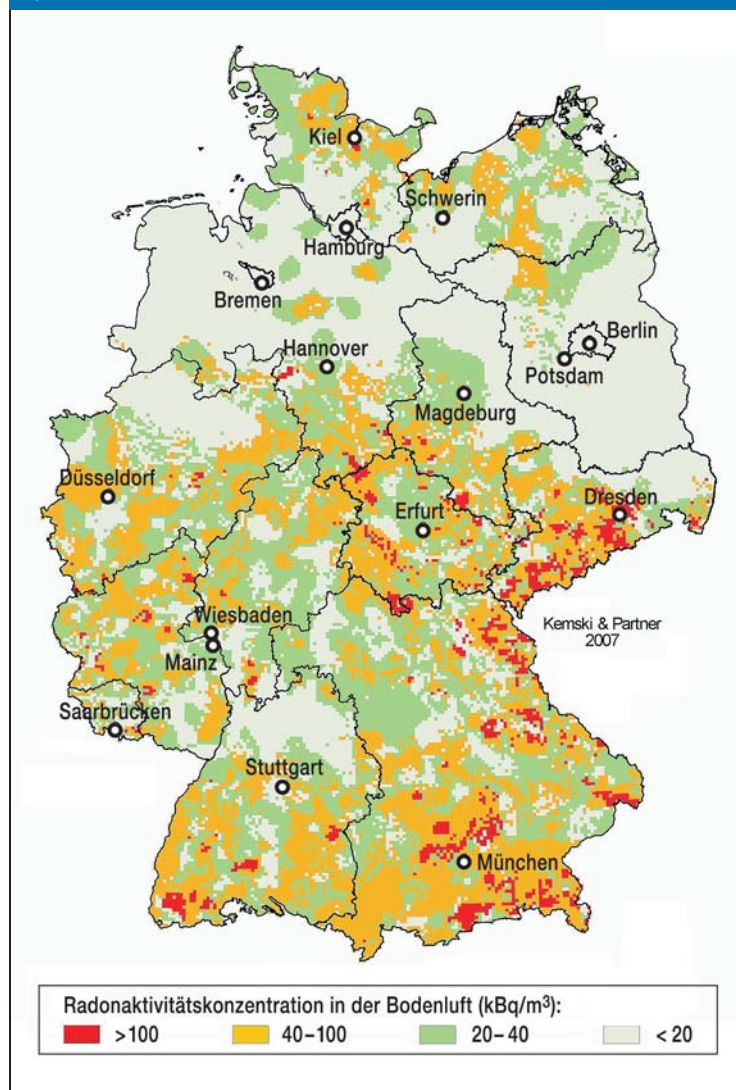
Klinische Nuklearmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg:  
 Prof. Dr. med. Kuwert

Erkrankungen an Lungenkrebs stehen bei den Krebsneuerkrankungen in Deutschland, sowohl bei Männern als auch bei Frauen, an dritter Stelle. Nach den aktuell verfügbaren Zahlen der Deutschen Krebsgesellschaft e.V. erkrankten im Jahre 2004 rund 46 040 Personen in Deutschland neu an Lungenkrebs, davon 32 850 Männer und 13 190 Frauen (1). Obwohl nach wie vor überwiegend Männer betroffen sind, zeigte sich in den letzten Jahren, dass der Anteil an Frauen, die Lungenkrebs bekommen, stetig ansteigt. Dieser Umstand wird allgemein in Zusammenhang mit dem Rauchverhalten gesehen (2). Schätzungen zufolge sind in Deutschland circa 80 bis 90 % aller Neuerkrankungen an Lungenkrebs auf das aktive Zigarettenrauchen zurückzuführen (2).

Dass auch Passivrauch die Gesundheit schädigt, ist wissenschaftlich unstrittig. Das deutsche Krebsforschungszentrum schätzt, dass in Deutschland jedes Jahr mehr als 260 Menschen an durch „Passivrauch“ bedingtem Lungenkrebs sterben (3). Hinzuzuwiesen ist darauf, dass es sich hierbei lediglich um einen Aspekt der negativen gesundheitlichen Wirkungen von Aktiv- und Passivrauchen handelt. Vielfältige weitere Effekte, zum Beispiel auf das Herz-Kreislauf-System, sind wissenschaftlich dokumentiert (3).

Neben dem Zigarettenrauch ist eine Vielzahl weiterer Noxen identifiziert worden, die Lungenkrebs beim Menschen verursachen können, zum Beispiel Asbest, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Arsen, 6-wertige Chromverbindungen und viele andere Substanzen. Meist spielt bei derartigen Expositionen die berufliche Tätigkeit die entscheidende Rolle (4). Auf die Notwendigkeit, in diesen Fällen eine ärztliche Anzeige über den Verdacht auf eine Berufskrankheit zu erstatten, sei an dieser Stelle hingewiesen (5). In der aktuellen umweltmedizinischen Diskussion in Deutschland werden als Noxen, die das Potenzial haben, in der Allgemeinbevölkerung Lungenkrebs zu verursachen, derzeit – neben den Schadstoffen aus Aktiv- und Passivrauchen – insbesondere Asbest und Emissionen aus Dieselmotoren diskutiert. Ziel des vorliegenden Artikels ist es, einen in der öffentlichen Diskussion bisher weitgehend unbeachtet gebliebenen Risikofaktor für die Entstehung von Lungenkrebskrankungen näher zu betrachten, nämlich Radon in den Innenräumen.

GRAFIK 1



Übersichtskarte des geogenen Radonpotenzials in Deutschland im Maßstab 1 : 2 000 000 als Ergebnis der deutschlandweiten Kartierung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe durch die Bonner Arbeitsgruppe „Radon“ (Geologisches Institut der Universität Bonn und Fa. Kemski & Partner). Die Karte kann als Orientierungshilfe dienen, lässt aber keinesfalls eine Prognose im regionalen Maßstab zu. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von: Kemski & Partner, Bonn

Bestandteile der Gesteine und Böden. Es sind mehrere Isotope des Radons bekannt, das stabilste Isotop ist Radon-222, das mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen zu Polonium-218 zerfällt (7). Im Sprachgebrauch und im Rahmen dieser Publikation schließt die Bezeichnung „Radon“ die Radonisotope und deren kurzlebige Zerfallsprodukte ein.

### Expositionsquellen

Das Vorkommen von Radon ist begründet durch das im Gestein und im Erdreich vorhandene Uran und Thorium. Die höchsten Radonkonzentrationen sind in Uranbergwerken zu finden (8). Aber auch in anderen Bergwerken können erhebliche Radonexpositionen auftreten. Diese Expositionen sind ebenso wie zum Teil Tätigkeiten in Wasserspeichern dem beruflichen Umfeld zuzuordnen und nicht Gegenstand dieses Artikels.

In der Radonbalneologie wird eine heilende Wirkung gering dosierter Alphastrahlung durch den Radongehalt mancher Heilbäder angenommen. Die Anwendung erfolgt dabei als „Radonbäder“ oder „Radon-Emanationen“, zum Beispiel beim Aufenthalt in „Heilstollen“. Diese nur sehr kurzzeitigen Expositionen im Rahmen therapeutischer Anwendungen bedürfen einer sorgfältigen Nutzen-Risiko-Abschätzung, die jedoch ebenfalls nicht Thema dieses Beitrags ist.

Ein Einflussfaktor auf die Radonaktivitätskonzentration an der Erdoberfläche ist der unterschiedliche Gehalt an Uran und Radium im Gesteins- und Bodenuntergrund. Hohe Werte findet man hier zum Beispiel im Erzgebirge, aber auch in anderen Regionen. Weitere Faktoren sind Prozesse, die innerhalb der Gesteine und Böden den Transport und die Freisetzung von Radon beeinflussen sowie klimatische und meteorologische Bedingungen in der Atmosphäre (6, 7). Eine von Kemski et al. für Deutschland durchgeführte Kartierung des geogenen Radonpotenzials (Grafik 1), basierend auf standardisierten Bodenluftmessungen, bestätigt eine hohe Variabilität, zum Teil auch in kleinräumigen Bereichen (9). In der bodennahen Luft können erhebliche Radonkonzentrationen auftreten, die Aktivitätskonzentration nimmt mit zunehmender Höhe über dem Erdboden ab. Durch Eingriffe des Menschen in die Natur – insbesondere im Bereich des Erzbergbaus – können lokal höhere Radonkonzentrationen vorkommen.

### Methodik

Für die vorliegende Arbeit wurden insbesondere Studien ausgewertet, die sich mit dem Lungenkrebsrisiko durch Radon in Innenräumen befassen. Hierzu führten die Autoren selektive Literaturrecherchen in PubMed, der Datenbank von Medline, durch und zogen eine kürzlich publizierte S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (6) sowie eine aktuelle Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission (7) zu diesem Thema heran.

### Was ist Radon?

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 und Thorium; es wird dort aus seinem Mutternuklid Radium gebildet. Die sehr langlebigen Ausgangskerne sind, einschließlich ihrer Zerfallsprodukte, natürliche

Trinkwasser kann in Abhängigkeit von den lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide aufweisen, die zu Strahlenexpositionen der Bevölkerung in einer Höhe führen können, die nicht mehr als geringfügig anzusehen ist (10). Der Radongehalt des Trinkwassers in Deutschland stellt für den Verbraucher ebenso wie der Radongehalt des Erdgases im Allgemeinen jedoch kein Problem dar (7).

In Baumaterialien kann Radon gebildet werden, das teilweise in die Häuser freigesetzt wird. In Deutschland spielt die Belastung durch Baumaterialien jedoch eine eher geringe Rolle (7).

Für die Belastung von Innenräumen mit Radon ist der Eintritt radonhaltiger Bodenluft aus dem Gebäudeuntergrund in das Gebäude entscheidend (e1). Über Undichtigkeiten in der Bodenplatte und den erdberührenden Wänden kann Radon in Häuser eindringen und sich dort anreichern (Grafik 2).

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

- der Beschaffenheit des Untergrundes, auf dem das Haus steht
- der Beschaffenheit der Bausubstanz
- den Witterungsbedingungen und den Druckverhältnissen (insbesondere dem Druckgradienten zwischen Untergrund und Gebäudeinnenräumen)
- der Jahreszeit (e2) (mit meist höheren Werten im Winterhalbjahr)
- dem Luftaustausch und der Dichtigkeit von Fenstern und Türen (6).

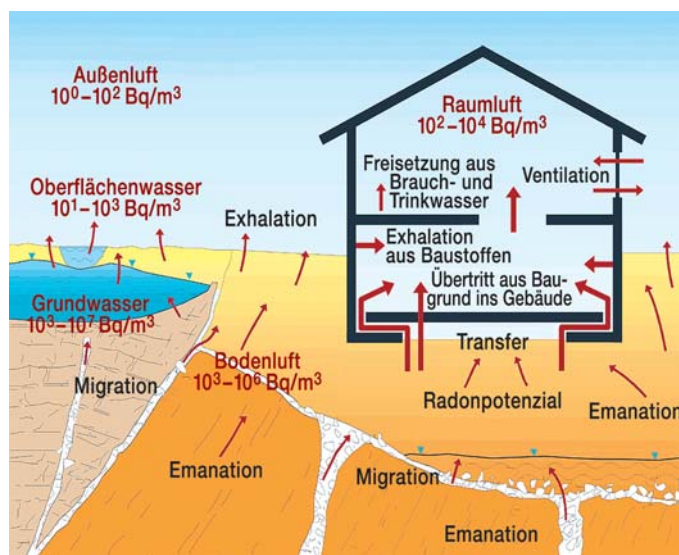
Innerhalb eines Gebäudes sind die Radonkonzentrationen nicht konstant. Im Keller ist die Konzentration meist am höchsten und nimmt zu den oberen Stockwerken hin ab.

Repräsentative Ergebnisse über die Verteilung der Radonkonzentrationen in den Innenräumen für Deutschland wurden aus vorhandenen Daten erstellt (7, 11). Die in Häusern und einzelnen Räumen konkret auftretenden Konzentrationen sind jedoch allenfalls statistisch abschätzbar (e3), für individuelle präventive Zwecke müssen sie in jedem Einzelfall durch Messungen bestimmt werden.

## Radiometrische Größen und Einheiten

Als Aktivität eines Radionuklids bezeichnet man die Anzahl der Zerfälle beziehungsweise Kernumwandlungen pro Zeiteinheit. Die Einheit der Aktivität ist Becquerel (Bq). Ein Bq entspricht dabei einem Zerfall pro Sekunde. Die Aktivitätskonzentrationen für Radon und die einzelnen Zerfallsprodukte werden volumenbezogen in  $\text{Bq/m}^3$  angegeben. Eine vor allem im Bergbau gebräuchliche Messeinheit ist das „Working Level“ (WL). Für die kumulierte Exposition wird entweder die Einheit  $\text{Bq/m}^3 \cdot \text{Stunde}$  oder die Einheit „Working Level Month“ (WLM) verwendet (10). Dabei entspricht ein WLM der Exposition gegenüber einem WL über einen Zeitraum von 170 Stunden (der monatlichen Arbeitszeit).

GRAFIK 2



Radon in der Umwelt. Die Radonaktivitätskonzentrationen in Gesteinen, Böden und Gewässern sowie in der Raum- und Außenluft überdecken weite Bereiche von wenigen  $\text{Bq/m}^3$  bis zu einigen Millionen  $\text{Bq/m}^3$ . Modifiziert nach: Kemski J, Klingel R, Siehl A: Das geogene Radon-Potential. In: Siehl A (ed.): Umweltradioaktivität. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 1996; 193 (e29). Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

## Expositionserfassung

Radonmessungen können kostengünstig mit passiven Messgeräten oder mit direkt ablesbaren elektronischen Apparaturen durchgeführt werden. Entscheidend dabei ist, dass die Messung fachgerecht und qualitätsgesichert durchgeführt wird (12, e4, e5). Aufgrund der erheblichen Schwankungen der Werte im zeitlichen Verlauf sind Kurzzeitmessungen nicht aussagekräftig. Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht auf seinen Internetseiten Listen mit Messstellen, die die notwendigen Anforderungen an die Qualitätssicherung erfüllen.

## Höhe der Exposition

Die Außenluftkonzentrationen von Radon liegen in Deutschland in einem Bereich zwischen 1 und  $15 \text{ Bq/m}^3$  (im Mittel circa  $9 \text{ Bq/m}^3$  [7]). In Innenräumen kann die Belastung sehr unterschiedlich sein und zwischen 10 und  $10\,000 \text{ Bq/m}^3$  betragen. Auf der Grundlage von Messungen in Wohn- und Schlafzimmern von 27 000 Wohnungen ergaben sich ein arithmetischer Mittelwert von  $49 \text{ Bq/m}^3$  und ein geometrischer Mittelwert von  $37 \text{ Bq/m}^3$  (7). In Deutschland findet man bei Messungen in Gebäuden Werte, die in circa 36 % der Fälle größer als  $100 \text{ Bq/m}^3$  und in etwa 18 % größer als  $200 \text{ Bq/m}^3$  sind (9). Extrem hohe Werte für Innenraumbelastungen durch Radon sind insbesondere in Wohngebäuden im Bereich alter Bergbaureviere anzutreffen (7).

Radonexpositionen in Innenräumen findet man nicht nur in Deutschland sondern weltweit, abhängig insbesondere vom geologischen Untergrund und der Bausubstanz der Gebäude.



## Biologische Effekte beim Menschen

Ein gehäuftes Auftreten von Lungenerkrankungen und insbesondere von Lungenkrebs bei Bergarbeitern im Erzgebirge ist seit mehr als 100 Jahren bekannt. Historisch wurde die Krankheit nach dem Ort Schneeberg auch „Schneeberger Lungenkrebs“ genannt (13). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnte Radon als Ursache hierfür identifiziert werden. Durch Inhalation von Radon kommt es lokal zu einer hohen Belastung mit Alpha-Strahlung im Bereich der Bronchialschleimhaut. Die energiereiche Alpha-Strahlung trifft die Zellen des Bronchialepithels und kann dort DNA-Schäden hervorrufen. Hierdurch können Tumorerkrankungen verursacht werden.

Seit langem wird der durch Radon verursachte Lungenkrebs als Berufskrankheit anerkannt und entschädigt. Bei der beruflichen Exposition im Uranerzbergbau wird zudem die Verursachung von anderen Tumorerkrankungen, insbesondere Leukämien – mit Ausnahme der chronisch-lymphatischen Leukämie –, Knochen- und Leberkrebs diskutiert (14). Hierbei sind jedoch auch die anderen Expositionsbedingungen beim Uranbergbau zu berücksichtigen, die bei einer Radon-Exposition in Innenräumen nicht vorliegen.

Es stellt sich die Frage, ob wissenschaftliche Erkenntnisse aus dem Bereich der Arbeitsmedizin auch auf den Bereich der Umweltmedizin übertragbar sind. Das Problem der Risikoabschätzung im Bereich niedriger Dosen besteht für viele Einwirkungen, beispielsweise auch durch Asbest. In der Umweltmedizin werden meist deutlich niedrigere Expositionen als im beruflichen Umfeld beobachtet, jedoch häufig über einen längeren Zeitraum. Dabei sind auch die Belange besonders empfindlicher Personengruppen, wie zum Beispiel Kinder, ältere Personen oder Vorerkrankte zu berücksichtigen (e6, e7).

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob und gegebenenfalls wie epidemiologische Erkenntnisse, die an Kollektiven mit hoher Exposition gewonnen wurden, für den Bereich niedriger Expositionen extrapoliert werden können. Für die epidemiologische Forschung ist es eine große Herausforderung, auch kleine Risiken, zum Beispiel im Umweltbereich durch gut geplante und durchgeführte Studien mit ausreichender Teilnehmerzahl, statistisch zu sichern und damit unabhängig von der Extrapolation zu einer eigenständigen Risikoabschätzung zu gelangen.

In der Umweltmedizin wurde zunächst die Bedeutung der Innenraumbelastung durch Radon für die Verursachung von Lungenkrebskrankungen kontrovers diskutiert (15). Eine Übersicht über die bis zum Jahre 2005 publizierten Einzelstudien gibt eine aktuelle Publikation der Strahlenschutzkommission (7), wobei laufend weitere Forschungsergebnisse veröffentlicht werden (e8–e10). So muss bei der Studienplanung und -durchführung, neben einer korrekten Erfassung der individuellen langzeitigen Radonbelastung in Wohnungen (e5, e6), das Rauchverhalten berücksichtigt werden. Einzelne kleinere Studien waren deshalb häufig nicht in der Lage, Risiken im Niedrigdosisbereich valide zu detektieren.

Erst mit größeren Studien und einer verbesserten epidemiologischen Methodik war hier ein Erkenntnisgewinn möglich. Zwischenzeitlich konnte durch die gemeinsame Auswertung mehrerer epidemiologischer Untersuchungen sowohl in Europa als auch in den USA und in China übereinstimmend ein Zusammenhang zwischen der Radon-Exposition in Innenräumen und dem Auftreten von Lungenkrebskrankungen nachgewiesen werden. In Deutschland wurden in den Studiengebieten Ost und West große Fall-Kontroll-Studien von Wichmann et al. (16), Krienbrock et al. (17) und Kreuzer et al. (18) durchgeführt, die zusammen einen Datensatz von 2 963 neu diagnostizierten Lungenkrebsfällen und eine Bevölkerungsstichprobe vom 4 232 Kontrollpersonen umfassten und in die europäische gepoolte Auswertung eingingen.

Auf europäischer Ebene gibt es eine gemeinsame Auswertung, die 13 Studien aus 9 Ländern einbezieht, mit insgesamt 7 148 Fällen und 14 208 Kontrollen (19). Wesentliche Ergebnisse dieser Analyse sind:

- Auch nach Berücksichtigung des Rauchverhaltens gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Radonkonzentration in Innenräumen und dem Auftreten von Lungenkrebskrankungen.
- Eine Dosis-Wirkungs-Beziehung wurde selbst im Bereich niedriger Dosen ( $< 200 \text{ Bq/m}^3$ ) gefunden ohne Hinweis darauf, dass ein Schwellenwert existiert.
- Radon in Innenräumen ist die Ursache für etwa 9 % aller Todesfälle infolge Lungenkrebs und etwa 2 % aller Todesfälle durch Krebs überhaupt in Europa (19).

Die europäischen Ergebnisse stimmen überein mit den Resultaten einer gemeinsamen Auswertung von 7 amerikanischen Fall-Kontroll-Studien mit 4 081 Fällen und 5 281 Kontrollen (e11, 20, 21) und einer gemeinsamen Auswertung zweier chinesischer Fall-Kontroll-Studien mit 1 050 Fällen und 1 996 Kontrollen (22).

Die durch die gemeinsame Auswertung von Fall-Kontroll-Studien gewonnenen Ergebnisse stehen dabei im Wesentlichen in Einklang sowohl mit Resultaten aus Tierversuchen und In-vitro-Studien als auch mit einer Extrapolation von Daten, die bei Bergarbeitern gewonnen wurden (e121, e13).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die wissenschaftlichen Studienergebnisse den eindeutigen Nachweis eines radonbedingten Lungenkrebsrisikos erbracht haben. Diese Erkenntnisse gingen ein in die entsprechenden Einstufungen nationaler und internationaler Gremien (e14–e24).

Die derzeit vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse sprechen für ein lineares Dosis-Wirkungs-Modell ohne Schwellenwert (e25). Über die Bedeutung der Radon-Exposition in Innenräumen für die Entstehung von Lungenkrebskrankungen und über die Notwendigkeit einer Intervention durch geeignete Messprogramme sowie sinnvolle Maßnahmen zur Verminderung der Radonexposition, besteht zwischenzeitlich weltweiter Konsens (23).

## Höhe des Risikos

Anhand der Ergebnisse der Europäischen Pooling-Studie zum Lungenkrebsrisiko durch Radon konnte gezeigt werden, dass pro 100 Bq/m<sup>3</sup> 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 (19). Zu der Zahl der in Deutschland durch Radon in Innenräumen verursachten Lungenkrebskrankungen liegt eine Schätzung vor (e26). Geht man von der Annahme aus, dass in Deutschland 5 % aller Todesfälle infolge Lungenkrebs durch Radon in Innenräumen verursacht werden, so kommt man auf 1 896 Fälle jährlich (e26). Diese Zahl übersteigt die geschätzte Zahl der durch „Passivrauch“ bedingten Lungenkrebskrankungen (circa 260 Fälle) (3) bei weitem und macht deutlich, dass Radon nach dem Zigarettenrauchen die zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebskrankungen in der beruflich nicht exponierten Allgemeinbevölkerung ist. Die gesundheitliche Relevanz anderer umweltbedingter Risiken wie zum Beispiel Asbest oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wird deutlich geringer eingeschätzt (7). Man nimmt an, dass durch eine Absenkung des Höchstwertes für die Radonkonzentration in Wohnungen auf 100 Bq/m<sup>3</sup> circa 300 Lungenkrebstodesfälle pro Jahr in Deutschland verhindert werden könnten (7).

## Erforderliche Maßnahmen

Es ist sinnvoll und geboten, die Radonkonzentration in Räumen, in denen sich Personen nicht nur vorübergehend aufhalten, so niedrig wie möglich zu halten. So wird zum Beispiel im Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit empfohlen, bei neu zu errichtenden Gebäuden einen Planungswert von < 100 Bq/m<sup>3</sup> zugrunde zu legen und bei Altbauten anzustreben (e27). Um das Eindringen von Radon zu verhindern, kommen bei der Sanierung bestehender Gebäude insbesondere eine Beseitigung von Undichtigkeiten im erdberührenden Gebäudeteil, Maßnahmen zur natürlichen oder mechanischen Be- und Entlüftung sowie eine Regulierung der Druckverhältnisse bis hin zu einer Absaugung unterhalb der Bodenplatte in Betracht. Der Erfolg dieser Verfahrensweisen ist durch Kontrollmessungen zu überprüfen. Erprobte Maßnahmen wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz im Radon-Handbuch Deutschland zusammengestellt (24).

Bei Neubauten ist es entscheidend, von vorne herein „radonsicher“ zu bauen. Neben der ethischen Verpflichtung einen als relevant erkannten Risikofaktor zu minimieren, werden Maßnahmen zu Expositionsminimierung auch unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten diskutiert (25, e28). Obwohl die Vermeidung und die Verminderung der Radonbelastung in Innenräumen Teil des Aktionsprogramms Umwelt und Gesundheit ist (e27), konnte ein Radonschutzgesetz in Deutschland bisher nicht verabschiedet werden.

## KERNAUSSAGEN

- Im arbeitsmedizinischen Kontext sind Lungenkrebskrankungen durch Radon, insbesondere bei Bergarbeitern im Uranbergbau, seit langem bekannt.
- Für die Allgemeinbevölkerung trägt die Radonkonzentration in Innenräumen wesentlich zur Höhe der natürlichen Strahlenexposition bei.
- Es ist in der wissenschaftlichen Literatur gut belegt, dass durch die Radonexposition in Innenräumen das Lungenkrebsrisiko relevant erhöht wird. Für Deutschland wurde geschätzt, dass durch Radon in Innenräumen jährlich 1 896 Todesfälle infolge Lungenkrebs verursacht werden.
- Zur Risikominimierung müssen Gebäude mit hoher Belastung identifiziert und anschließend gegebenenfalls bauliche Maßnahmen eingeleitet werden. Bei Neubauten ist auf „Radonsicherheit“ zu achten.
- Das Problem der Radonbelastung in Innenräumen muss in der aktuellen umweltpolitischen Diskussion in Deutschland stärker berücksichtigt werden.

## Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

## Manuskriptdaten

eingereicht: 27. 5. 2009, revidierte Fassung angenommen: 14. 8. 2009

## LITERATUR

1. DKG Krebsgesellschaft: Krebshäufigkeit – die aktuellen Zahlen 2004. [www.krebsgesellschaft.de/krebshaefigkeit,11267.html](http://www.krebsgesellschaft.de/krebshaefigkeit,11267.html)
2. Deutsches Krebsforschungszentrum (ed.): Frauen und Rauchen in Deutschland. Heidelberg 2008; [www.tabakkontrolle.de/pdf/Frauen\\_und\\_Rauchen\\_Band\\_9.pdf](http://www.tabakkontrolle.de/pdf/Frauen_und_Rauchen_Band_9.pdf)
3. Deutsches Krebsforschungszentrum (ed.): Passivrauchen – ein unterschätztes Gesundheitsrisiko. Heidelberg 2005. [www.tabakkontrolle.de/pdf/Passivrauchen\\_Band\\_5\\_2Auflage.pdf](http://www.tabakkontrolle.de/pdf/Passivrauchen_Band_5_2Auflage.pdf)
4. Popp W, Brüning T, Straif K: Krebserkrankungen durch den Beruf. Dtsch Arztebl 2003; 100(1–2): A 35–40.
5. Baur X, Latza U, Butz M: Arbeitsbedingte Erkrankungen der Lunge und der Atemwege sowie Neoplasien. Dtsch Arztebl 2003; 100(41): A 2658–65.
6. Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften: Umweltmedizinische Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM): Radon in Innenräumen. 11/2008; <http://awmf.org/>
7. Strahlenschutzkommission: Radon und Lungenkrebs. In: Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Band 62: Einfluss der natürlichen Strahlenexposition auf die Krebsentstehung in Deutschland. Berlin: H. H. Hoffmann GmbH Fachverlag 2008; 116–66.
8. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und Bergbau Berufsgenossenschaft (ed.): Belastung durch ionisierende Strahlung im Uranerzbergbau der ehemaligen DDR. Abschlussbericht zu einem Forschungsvorhaben. Sankt Augustin 1998.
9. Kemski & Partner: Informationsseite zum Thema Radon und Radioaktivität. [www.radon-info.de](http://www.radon-info.de)
10. Strahlenschutzkommission: Stellungnahme Strahlenexposition durch Radon-222 im Trinkwasser. Vom 3. August 2004. BAnz. 159 vom 25.08.2004; S. 18957.

11. Menzler S, Schaffath RA, Wichmann HE, Kreienbrock L: Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. Landsberg/Lech: Ecomed Verlag 2006.
12. Strahlenschutzkommission Veröffentlichungen: Band 47 Leitfragen zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten. Redaktion: Olaf Sarenio, Bonn: H. H. Hoffmann GmbH Fachverlag 2002; 1–180.
13. Härtig FH, Hesse W: Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. Vierteljahresschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen. Neue Folge 1879; 30: 296–309.
14. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (ed.): BK-Report Berufskrankheiten-Forum. Berichtsband über das Fachgespräch Extrapulmonale Krebserkrankungen Wismut am 12. Februar 1998 in Hennef. Essen: Prepress & Media Service GmbH 2000.
15. Field RW, Duport PJ, Hendee WR: Exposure to residential radon causes lung cancer—point/counterpoint. Med Phys 2003; 30: 485–8.
16. Wichmann HE, Gerken M, Wellmann J, et al.: Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (Ost). In: Wichmann HE, Schlipkötter HW, Füllgraß G (eds.): Fortschritte in der Umweltmedizin. Landsberg/Lech: Ecomed Verlag 1999.
17. Kreienbrock L, Kreuzer M, Gerken M, et al.: Case-control study on lung cancer and residential radon in West Germany. Am J Epidemiology 2001; 153: 42–52.
18. Kreuzer M, Heinrich J, Wölke G, et al.: Residential radon and risk of lung cancer in Eastern Germany. Epidemiology 2003; 14: 559–68.
19. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al.: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. BMJ 2005; 330: 223–9.
20. Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, et al.: Residential radon and risk of lung cancer, a combined analysis of 7 North American case-control studies. Epidemiology 2005; 16: 137–45.
21. Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, et al.: 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: 533–97.
22. Lubin J H, Wang Z Y, Boice J D, et al.: Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. Int J Cancer 2004; 109: 132–7.
23. Zielinski 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: 759–69.
24. Bundesamt für Strahlenschutz: Radon-Handbuch Deutschland. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW – Verlag für neue Wissenschaft GmbH 2001.
25. Gray A, Read S, McGale P, Darby S: Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. BMJ 2009; 338a3110 doi:10.1136/bmj.a3110.

#### **Anschrift für die Verfasser**

PD Dr. med. Klaus Schmid  
Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin  
der Universität Erlangen-Nürnberg  
Schillerstraße 25  
91054 Erlangen  
E-Mail: klaus.schmid@rzmail.uni-erlangen.de

#### **SUMMARY**

##### **Radon in Indoor Spaces—An Underestimated Risk Factor for Lung Cancer in Environmental Medicine**

**Background:** Occupational medicine has long recognized radon to be a cause of lung cancer, especially among miners working under ground. Until recently, however, little scientific evidence was available about the risk to the general population caused by indoor radon.

**Methods:** The authors analyzed literature that they found by a selective search in the light of the recently published S1 guideline of the German Society of Occupational and Environmental Medicine (Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin) and a recent publication of the German Commission on Radiological Protection (Strahlenschutzkommission).

**Results:** Exposure to indoor radon and its decay products is a major contributor to the radiation exposure of the general population. In Germany, the mean radiation exposure due to radon in living rooms and bedrooms is about 49 Bq/m<sup>3</sup>. It is well documented in the scientific literature that indoor radon significantly increases the risk of lung cancer, probably in a linear dose-response relationship with no threshold. Every 100 Bq/m<sup>3</sup> increase in the radon concentration is estimated to increase the relative risk for lung cancer by 8% to 16%. After cigarette smoking, radon is the second main cause of lung cancer in the general population without occupational exposure.

**Conclusions:** From the point of view of preventive environmental medicine, it is important to identify buildings with high radon concentrations, initiate appropriate measures, and minimize radon exposure, particularly in new buildings.

**Zitierweise: Dtsch Arztebl Int 2010; 107(11): 181–6**  
**DOI: 10.3238/arztebl.2010.0181**



Mit „e“ gekennzeichnete Literatur:  
[www.aerzteblatt.de/lit1110](http://www.aerzteblatt.de/lit1110)

The English version of this article is available online:  
[www.aerzteblatt-international.de](http://www.aerzteblatt-international.de)

## ÜBERSICHTSARBEIT

# Radon in Innenräumen

Ein in der umweltmedizinischen Diskussion unterschätzter Risikofaktor für Lungenkrebs

Klaus Schmid, Torsten Kuwert, Hans Drexler

## eLITERATUR

- e1. 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. [www.apug.de/archiv/pdf/BMU\\_Radonsicherheit.pdf](http://www.apug.de/archiv/pdf/BMU_Radonsicherheit.pdf)
- e2. Krewski D, Mallick R, Zielinski JM, Létourneau EG: Modeling seasonal variation in indoor radon concentrations. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2005; 15: 234–43.
- e3. Andersen C E, Raaschou-Nielsen O, Andersen HP, et al.: Prediction of  $^{222}\text{Rn}$  in Danish dwellings using geology and house construction information from central databases. *Radiat Prot Dosimetry* 2007; 123: 83–94.
- e4. Steck DJ, Field RW: Dosimetric challenges for residential radon epidemiology. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 655–64.
- e5. Beck TR, Buchröder H, Foerster E, Schmidt V: Interlaboratory comparison for passive radon measuring devices at BFS. *Radiation Protection Dosimetry* 2007; 125: 572–75.
- e6. Drexler H, Elsner P: Grundwissen Klinische Umweltmedizin. Bern: Verlag Hans Huber, Hogrefe AG 2007.
- e7. Herr C, Otterbach I, Nowak D, Hornberg C, Eikmann T, Wiesmüller G: Clinical Environmental Medicine [Klinische Umweltmedizin]. *Dtsch Arztebl Int* 2008; 105(30): 523–31.
- e8. Sandler DP, Weinberg CR, Shore DL, et al.: Indoor radon and lung cancer risk in Connecticut and Utah. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 633–54.
- e9. Thompson RE, Nelson DF, Popkin JH, Popkin Z: Case-control study of lung cancer risk from residential radon exposure in Worcester County, Massachusetts. *Health Phys* 2008; 94: 228–41.
- e10. Wilcox HB, Al-Zoughool M, Garner MJ, et al.: Case-control study of radon and lung cancer in New Jersey. *Radiation Protection Dosimetry* 2008; 128: 169–79.
- e11. Field RW, Krewski D, Lubin JH, et al.: 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.
- e12. Lubin JH, Boice JD, Jr: Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. *Journal of the National Cancer Institute* 1997; 89: 49–57.
- e13. Lubin JH, Tomasek L, Edling C, et al.: Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat Res* 1997; 147: 126–34.
- e14. International Agency for Research on Cancer: Evaluation of carcinogenic risks to humans: Man-made mineral fibres and radon. Monograph. Lyon, France: IARC 1988; 43.
- e15. International Agency for Research on Cancer: IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Ionizing radiation, Part 2: Some internally deposited radionuclides. Lyon, France: IARC 2001; 78.
- e16. World Health Organization: Air quality guidelines for Europe. 2<sup>nd</sup> edition. WHO regional publications 1996.
- e17. National Research Council: Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR VI Report). Health effects of exposure to radon. Board on radiation effects research, commission on life science. Washington. D.C.: National Academy Press 1999.
- e18. U.S. Environmental Protection Agency: A citizen's guide to radon. 2009. [www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon).
- e19. U.S. Environmental Protection Agency: Assessment of risks from radon in homes, EPA 402-R-03–003, Washington D.C.: Office of Public Awareness 2003.
- e20. National Academy of Science: Comparative dosimetry of radon in mines and homes. Washington D.C.: National Academy Press 1991.
- e21. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations 1994.
- e22. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources and effects of ionizing radiation. Volume II. New York: United Nations; UNSCEAR 2000.
- e23. International Commission on Radiological Protection: Protection against radon 222 at home and at work. ICRP Publ. 65. *Annals of the ICRP*, Vol. 23, No 2. New York: Elsevier 1993.
- e24. Strahlenschutzkommission: Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung. Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission. Bd. 19, G. Stuttgart, New York: Fischer Verlag 1992.
- e25. Samet J M: Residential radon and lung cancer: end of the story? *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 2006; 69: 527–31.
- e26. Menzler S, Piller G, Gruson M, Rosarion AS, Wichmann HE, Kreienbrock L: Population attributable fraction for lung cancer due to residential radon in Switzerland and Germany. *Health Phys* 2008; 95: 179–89.
- e27. Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit: Vermeidung und Verminderung der Radonbelastung von Innenräumen: [www.apug.de/uug/strahlung/radon-wohnungen.htm](http://www.apug.de/uug/strahlung/radon-wohnungen.htm)
- e28. Stigum H, Strand T, Magnus P: Should radon be reduced in homes? A cost-effect analysis. *Health Physics* 2003; 84: 227–35.
- e29. Kemski J, Klingel R, Siehl A: Das geogene Radon-Potential. In: Siehl A (ed.): *Umweltradioaktivität*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 1996; 193.