



Radon – die (un)heimliche Bedrohung

Teil 1



Es ist weder giftig noch brennbar oder explosiv, aber seine Zerfallsprodukte sind hochgefährlich. Das Edelgas Radon lauert dabei je nach Wohnort teilweise in hohen Konzentrationen in unseren Gebäuden. Im ersten Teil dieses Artikels beleuchten wir die Grundlagen und das Vorkommen von Radon und stellen geeignete Messgeräte vor.



Was macht eine gute Innenraumluftqualität (Indoor Air Quality, IAQ) aus? Natürlich die Abwesenheit von Schadstoffen jeder Art und ausreichend Sauerstoff. Am besten die Reinheit von frischer Berg-, Wald- oder Seeluft. In Analogie zum deutschen Reinheitsgebot für die Herstellung von Bier, wonach nur Hopfen, Gerstenmalz, Hefe und Wasser als Inhaltsstoffe zulässig sind, braucht gute Atmosphärenluft nur Stickstoff (78,084 %), Sauerstoff (20,946 %), Argon (0,934 %) und diverse Spurengase in Konzentrationen von Promillebruchteilen.

Das ist für einen Städter inner- und außerhalb seiner Stadtwohnung ein nicht erfüllbarer Traum. Schon im urbanen Freien finden sich zahlreiche, durch menschliche Aktivitäten erzeugte Fremdstoffe in der Luft: Industrieabgase, Schadstoffe aus den Verbrennungsmotoren der Automobile und mit fossilen Brennstoffen (Öl, Gas, Kohle) betriebenen Kraftwerken und Heizungen sowie mit Holz beheizten Öfen und Kaminen. Die ungesunden Beimengungen umfassen Kohlenmonoxid und -dioxid, Stickoxide (NO_x), Feinstäube, Ruß, Ozon, flüchtige organische Verbindungen (VOCs) ... Hinzu kommt, dass in Städten der natürliche Luftaustausch durch zugebaute Luftschneisen erschwert wird, was die Verdünnung oder bestenfalls den Austausch der schlechten durch gute Luft nur unzureichend ermöglicht.

Die Luftverschmutzung nahm als Folge der zunehmenden Industrialisierung und der damit verbundenen Steigerung der Bevölkerungsdichte ab der Mitte des 19. Jahrhunderts speziell in den Ballungszentren rasant zu. Die daraus resultierenden Probleme für die Lungengesundheit der breiten Massen führten zum Bau von Lungenheilstätten in abgelegenen, waldreichen Gegenden vorzugsweise in den Bergen oder an der See. Ihre Absicht illustriert exemplarisch eine Steintafel am Eingang des Geländes der inzwischen zum Geisterort verkommenen Lungenheilstätte Charlottenhöhe bei Schömberg im Nordschwarzwald. Da heißt es: „Waldesluft und Sonnenschein halten Herz und Lunge rein.“

Aber zu den Problemen von heute: Die Europäische Umweltagentur (European Environment Agency, EEA) hat im Oktober 2017 ihre Berechnungen vorgestellt. Danach hat die Luftverschmutzung in Europa im Jahr 2014 zum vorzeitigen Tod von mehr als 520.000 Menschen geführt – mehr als 80.000 davon in Deutschland. Rund 400.000 dieser Todesfälle in Europa und etwa 66.000 in Deutschland ließen sich auf die Belastung durch Feinstaub zurückführen. Stickoxide sind demnach für den Tod von knapp 13.000 Menschen in Deutschland verantwortlich. Naturgemäß sind Menschen in Ballungsräumen davon besonders betroffen.

Der Gesetzgeber hat inzwischen bei der Überschreitung gewisser Schadstoffgrenzwerte den Betrieb der Emittenten verboten oder zumindest eingeschränkt. Man denke an Fahrverbote in städtischen Luftreinhaltezone, die allerdings oft nur die überlasteten Gebiete verschieben, weil der Verkehr in Umgehung der gesperrten Zonen Umwege über frei befahrbare Straßen nimmt und dort die Schadstoffkonzentration in der Atmosphärenluft in die Höhe treibt. In Gebäuden mit Büros, Fertigungsstätten, Klassenzimmern,

Sportstudios, Wohnungen usw., wo sich der moderne Mensch meist länger als im Freien aufhält, kommen noch weitere innenraumspezifische Probleme hinzu.

Schadstoffe in der Innenraumluft

Bei der Überwachung der Innenraumluftqualität wurden bisher im Wesentlichen die CO₂-Konzentration und die relative Luftfeuchtigkeit (rF) berücksichtigt. Bei einer Überschreitung gewisser Grenzwerte (CO₂: 800 ppm, rF: 40–60 %) sind Lüftungstechnische Maßnahmen angezeigt. In der qualitativen Klassifizierung der Innenraumluft (Indoor Air: IDAx mit x=1, 2, 3, 4) nach DIN EN 13779: 2007-09 kennzeichnet IDA1 eine Raumluft als hochwertig, deren CO₂-Konzentration weniger als 400 ppm über einer Außenluft mit 400 ppm CO₂ liegt, also 800 ppm nicht übersteigt. Einzelheiten kann man der Schrift „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ des Umweltbundesamtes (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf) entnehmen.

Als behaglich wird allgemein eine zugfreie Innenraumluft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 60 % und einer Temperatur von etwa 21 °C angesehen. Aber reicht das aus, um eine solche Luft als langfristig gesund zu charakterisieren? Diese Frage muss eindeutig mit Nein beantwortet werden, denn in der realen Innenraumluft sind viele weitere gesundheitsschädigende Inhaltsstoffe vorhanden, deren kumulative Einflüsse auf den menschlichen Organismus zum Teil erst in der jüngeren Vergangenheit erkannt wurden. Man denke an lungengängige Feinstäube, Bakterien und Mikroorganismen, Kosmetika, Pestizide, Sprays, Arzneimittel, Chemikalien und die enorme Zahl flüchtiger organischer Verbindungen, die in ihren nahezu unendlichen Kombinationen komplexe, weitgehend unerforschte Wirkungen auf biologische Organismen haben. Hinzu kommt ein bis heute immer noch weitgehend vernachlässigter, überwiegend aus natürlichen Quellen stammender weiterer Schadbestandteil der Luft: **Das ionisierende Edelgas Radon.**

Der Mensch ist in seiner Lebensumgebung ständig ionisierender Strahlung ausgesetzt. Etwa die Hälfte der mittleren, jährlichen effektiven Strahlendosis stammt aus zivilisationsbedingten Strahlenquellen, überwiegend aus medizinischen Anwendungen. Die zweite Hälfte der Strahlendosis liefern natürliche Quellen. Davon hat die Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten den mit Abstand größten Anteil (Bild 1). Eine Verminderung der Radonexposition kann deshalb die Gesamtstrahlendosis und die damit verbundenen Gesundheitsrisiken merklich verringern.

Die Tatsache, dass sich der Mensch heute bis zu 90 % in Räumen (wo die Radonkonzentration in der Regel am höchsten ist!) und nicht

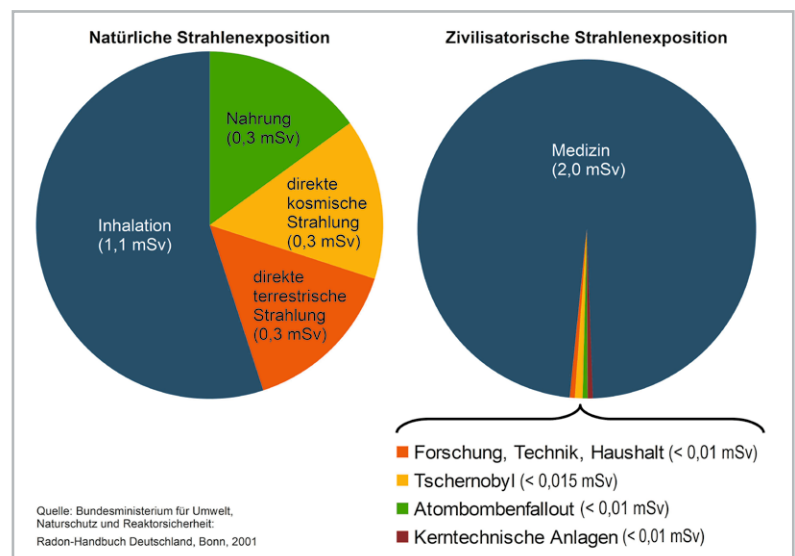


Bild 1: Mehr als die Hälfte der natürlichen Strahlendosis nimmt der Mensch über Radon in der Atemluft auf.

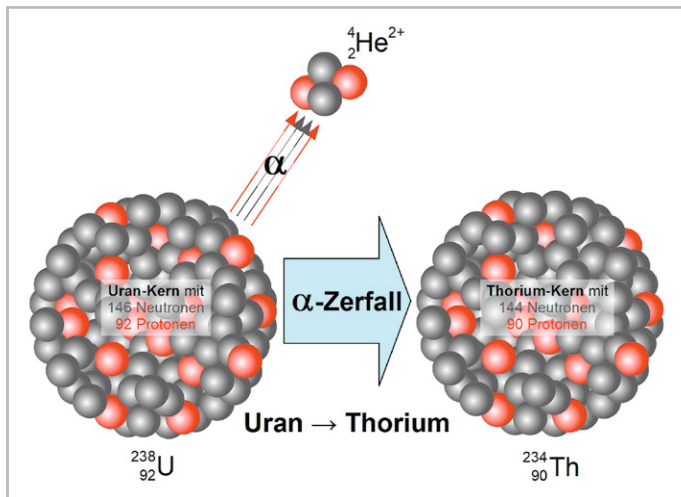


Bild 2: Alphastrahlung ist eine Teilchenstrahlung, bei der ein zerfallender Atomkern (Mutterkern) einen Helium-4-Atomkern (α -Teilchen) aussendet und dadurch zum Tochterkern wird.

im Freien aufhält und dabei den vielfältigen schädlichen Innenlufteinflüssen ausgesetzt ist (hohe Expositionsdauer!), verdeutlicht die Notwendigkeit einer weiter gefassten Überwachung der IAQ, die auch Radon einschließt.

Physikalische Hintergründe

Der Name Radon ist vom lateinischen „Radius“ (Strahl) abgeleitet und weist auf eine wichtige Eigenschaft des Gases hin. Radon ist radioaktiv! Radon entsteht als Zwischenprodukt in der Zerfallsreihe von Uran 238 und zerfällt (zerstrahlt) seinerseits wieder in eine Reihe radioaktiver Folgeprodukte, an deren Ende stabiles Blei (Pb 206) steht.

Der Zerfall in ein Folgeprodukt erfolgt über Abgabe von α - oder β -Strahlung. Die sogenannte Halbwertszeit gibt an, wie lange es dauert, bis sich eine radioaktive Substanz auf die Hälfte ihrer Masse zerstrahlt hat. Sie ist charakteristisch für die Substanz und kann zwischen Milliarden Jahren und Bruchteilen von Sekunden liegen.

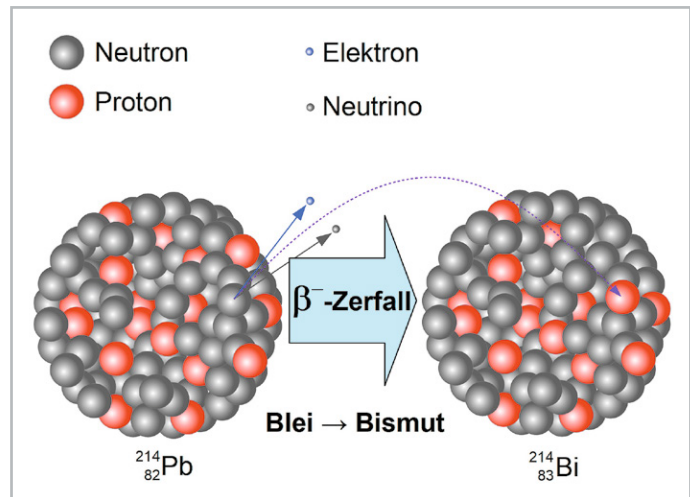


Bild 3: Beim Betazerfall gibt ein Neutron des Kerns ein Elektron und ein Neutrino ab, wodurch es sich zu einem Proton wandelt.

Bild 2 demonstriert einen α -Zerfall von Uran 238 (Mutterkern) zu Thorium 234 (Tochterkern). Dabei wird ein aus zwei Neutronen und zwei Protonen bestehendes Heliumteilchen aus dem instabilen Urankern ausgeschleudert. Der Verlust dieser vier Kernbausteine macht aus dem Uranatom 238 ein Thoriumatom 234, welches weiter zerfällt. Bild 3 zeigt beispielhaft, wie ein Pb-214-Kern (Pb=Plumbum, lat. Blei) durch einen β^- -Zerfall zu Bismut 214 mutiert. Dabei gibt ein Neutron des Kerns ein Elektron und ein Neutrino ab, wodurch es sich zu einem Proton wandelt (gestrichelter violetter Pfeil). Weniger häufig ist der β^+ -Zerfall, bei dem sich ein Proton des Kerns durch Abgabe eines Positrons in ein Neutron umwandelt.

Die vollständige Zerfallsreihe von radioaktivem Uran 238 über Radon 222 zu stabilem Blei 206 mit den jeweiligen Halbwertszeiten zeigt Bild 4.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass bei den α - und β -Kernzerfallsvorgängen auch überschüssige Energie in Gestalt von elektromagnetischer γ -Strahlung abgegeben werden kann. Diese ist wegen ihrer großen Reichweite und der schädigenden Wirkung bei der Bestrahlung biologischer Zellstrukturen nicht zu vernachlässigen und muss durch Strahlenschutzmaßnahmen (meist Bleiabschirmungen) von Lebewesen ferngehalten werden.

Uran 238	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	4,46 Milliarden Jahren zu	Thorium 234
Thorium 234	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	24,1 Tagen zu	Proactinium 234
Proactinium 234	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	46,69 Stunden zu	Uran 234
Uran 234	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	245.500 Jahren zu	Thorium 230
Thorium 230	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	75.400 Jahren zu	Radium 226
Radium 226	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	1.599 Jahren zu	Radon 222
Radon 222	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	3,82 Tagen zu	Polonium 218
Polonium 218	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	3,04 Minuten zu	Blei 214
Blei 214	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	27 Minuten zu	Bismut 214
Bismut 214	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	19,9 Minuten zu	Polonium 210
Polonium 210	zerfällt mit einer Halbwertszeit von	0,16 Millisekunden zu	Blei 206 (stabil)

Bild 4: Die Tabelle zeigt, mit welchen Halbwertszeiten Uran 238 in seine Folgeprodukte zerfällt. Am Ende der Zerfallsreihe steht stabiles Blei 206.

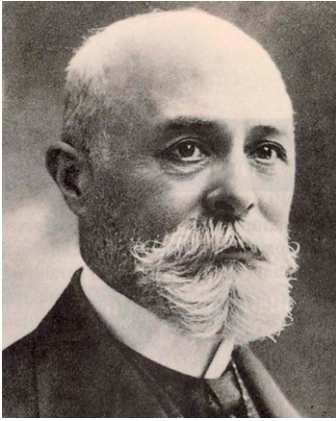


Bild 5: Der französische Physiker Henri Becquerel erhielt 1903 gemeinsam mit Marie und Pierre Curie den Nobelpreis für Physik für die Entdeckung der Radioaktivität.

Natürliche Radonvorkommen

Da Uran nahezu allgegenwärtig in weit variierenden Konzentrationen in der Erdkruste zu finden ist, bildet sich in der Bodenluft (das Erdreich besteht zu etwa einem Viertel aus Luft) nahezu überall Radon, was die Bodenluft radioaktiv macht. Das darin enthaltene Radon zerfällt mit einer Halbwertszeit von knapp vier Tagen in seine radioaktiven Folgeprodukte. Ein Maß für die Intensität der Radioaktivität ist die Anzahl der Zerfälle pro Sekunde.

Die Einheit Bq wurde nach dem französischen Physiker Henri Becquerel (1852–1908) benannt (Bild 5). Ein Bq entspricht dem Zerfall von einem Atom pro Sekunde. Radonkonzentrationen in der Bodenluft verursachen mittlere Radioaktivitäten von einigen 10.000 Bq/m³, können aber in manchen Gegenden auch 1 Million Bq/m³ überschreiten. Ihre Messung erfolgt in der Regel in 1 m Tiefe unter der Erdoberfläche. In Wohnräumen liegt der zulässige Grenzwert viel niedriger, kann aber durch eindringende Bodenluft leicht überschritten werden.

Erstaunlich ist, welche geringe Masse an Radon bereits erhebliche Zerfallsaktivitäten entfaltet. Nach schwedischen Forschungen (Pershagen et. al, „Residential radon exposure and lung cancer in Sweden“, New Engl J Med 330: 59-164, 1994) genügt eine Radonmasse von $17,6 \cdot 10^{-9}$ g, um 1 Million Zerfälle in einem Kubikmeter Volumen zu verursachen. Gelegentlich findet man noch für Radonkonzentrationen die veraltete Bemessungsgröße pCi/l (Picocurie pro Liter), wobei ein 1 Bq/m³ = 36,9 pCi/l bzw. 1 pCi = 2,2 Zerfällen in einer Minute entspricht.

Die lokalen Bodenluft-Radonkonzentrationen schlagen sich in Mittelwerten in den Wohnungen nieder (Bild 6). Im Freien stellen die Radonausgasungen wegen der starken Verdünnung mit Atmosphärenluft eine meist zu vernachlässigende Gefahr dar.

Gesetzliche Pflicht zum radonsicheren Bauen

Ganz aktuell sind die Vorgaben des am 3. Juli 2017 im Bundesgesetzblatt verkündeten und am 1. Dezember 2018 in Kraft tretenden deutschen Strahlenschutzgesetzes (Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung), worin die gesetzliche Radonrichtlinie EURATOM 2013/59 umgesetzt wurde. In § 124 heißt es: „Der Referenzwert für die über das

Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft in Aufenthaltsräumen beträgt 300 Becquerel je Kubikmeter.“ Damit wird zwar der ursprüngliche Referenzwert von 1000 Bq/m³ in Räumen deutlich gesenkt, aber die Empfehlung des Bundesinstituts für Strahlenforschung (BfS) ignoriert. Sie lautet: „Oberhalb von 100 Becquerel pro Kubikmeter sollten immer Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration in Betracht gezogen werden.“ (Quelle: <http://www.eggbi.eu/forschung-und-lehre/zudiesemthema/radonbelastungen-in-gebaeuden/#c1451>).

Heute ist jedenfalls radonsicheres Bauen in Deutschland gesetzliche Vorschrift, was vielen Fachplanern und den meisten Bauherren bisher noch nicht bekannt ist.

Radon im Bergbau

In den Bergwerken im Umfeld der Bergbaustädte Joachimsthal und Schneeberg im Erzgebirge war jahrhundertlang der frühe Tod der Bergleute an der rätselhaften „Schneeberger Krankheit“ eine schreckliche, unerklärliche Folge ihres Berufs. Heute weiß man, dass die abgebauten Erze Bismut (auch Wismut genannt), Kobalt und Nickel häufig mit Uran verwachsen sind, wodurch sich dessen Zerfallsprodukt Radon in hohen

Durchschnittliche Radonkonzentrationen (geometrischer Mittelwert) in Wohnungen in Deutschland

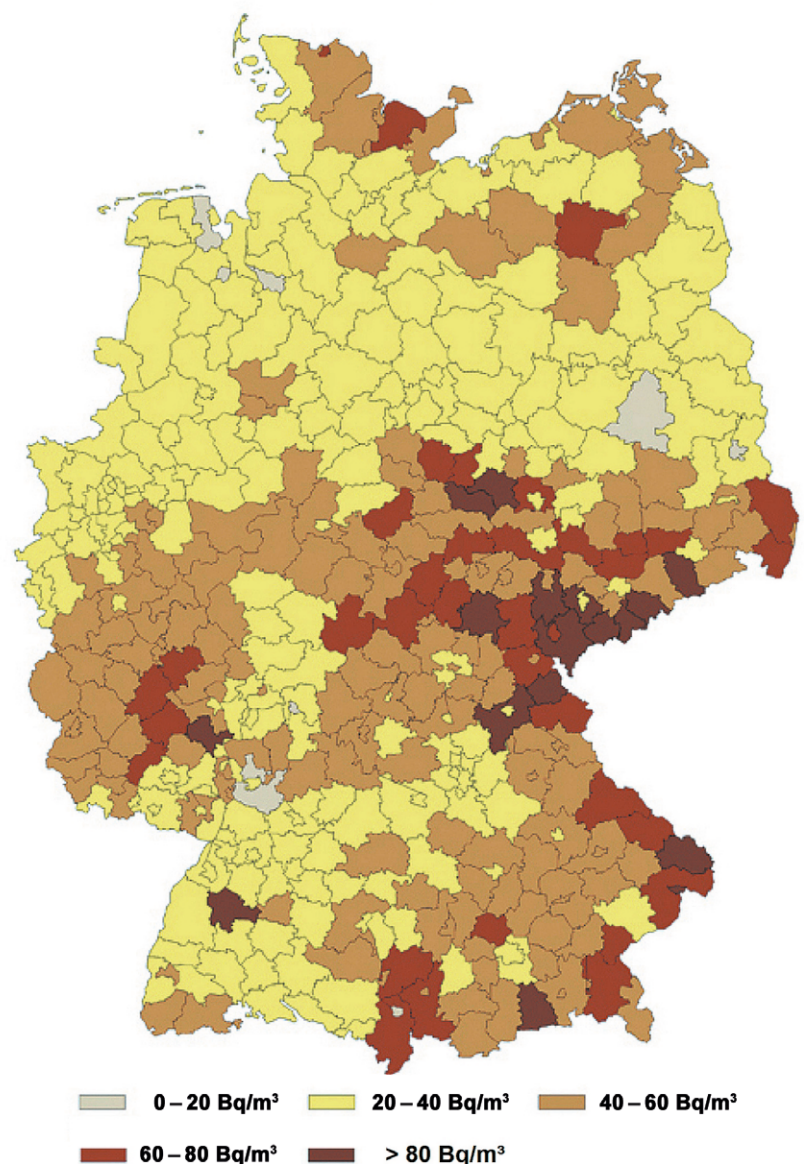


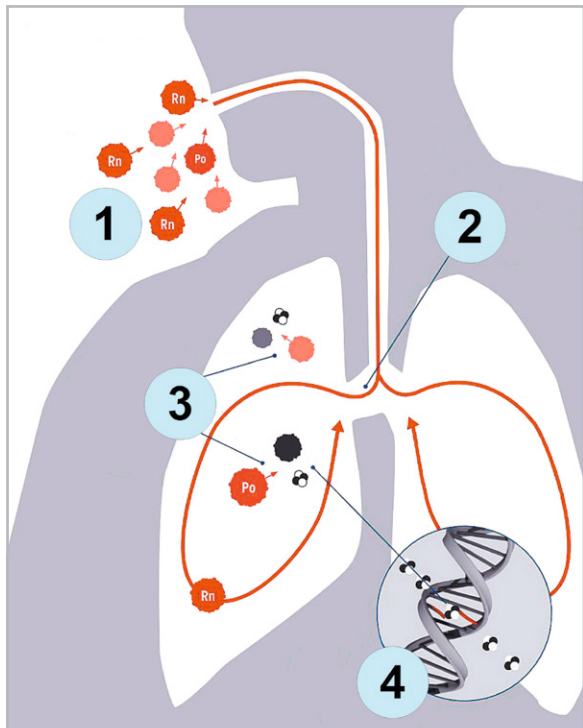
Bild 6: Durch Stichproben ermittelte Durchschnittswerte für Radonexpositionen in deutschen Wohnungen. (Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz)



Quelle: www.smithsonianmag.com
Mining foreman R. Thornburg shows a small cage with a canary used for testing carbon monoxide gas in 1928.
(George McCas, U.S. Bureau of Mines)

Bild 7: Tückisch – Radon ist mit den Sinnesorganen von Mensch und Tier auch in hohen Konzentrationen nicht wahrnehmbar.

Konzentrationen in den Stollen bildet. Für die Bergleute war das Radon besonders tückisch, weil man es auch in hohen Konzentrationen nicht sehen, riechen und schmecken kann. Es ist zudem ungiftig, inert (reaktionsträge), weder brennbar noch explosiv und



- 1 Der größte Teil des Radons zerfällt bereits außerhalb der Lunge. Mit der Atemluft gelangen Radon und die Folgeprodukte (direkt oder angelagert an Stäube oder Aerosole) in die Lunge.
- 2 Vom eingeatmeten Radon zerfällt aufgrund seiner kurzen Aufenthaltszeit in der Lunge und seiner relativ langen Halbwertszeit vergleichsweise wenig in der Lunge.
- 3 Beim Zerfall der eingeatmeten kurzlebigen Zerfallsprodukte, wie z. B. Polonium, entsteht neben β -Strahlung die biologisch besonders wirksame α -Strahlung.
- 4 Vor allem die α -Strahlung kann die DNA (deoxyribonucleic acid = Desoxyribonukleinsäure) als Trägerin des Erbguts in den strahlenempfindlichen Zellen des Lungengewebes schädigen und dadurch Krebs auslösen.

Bild 9: Die biologisch besonders aktive α -Strahlung der Folgeprodukte beim Radonzerfall verursacht krebsauslösende Veränderungen der Lungenzellen. (Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz)

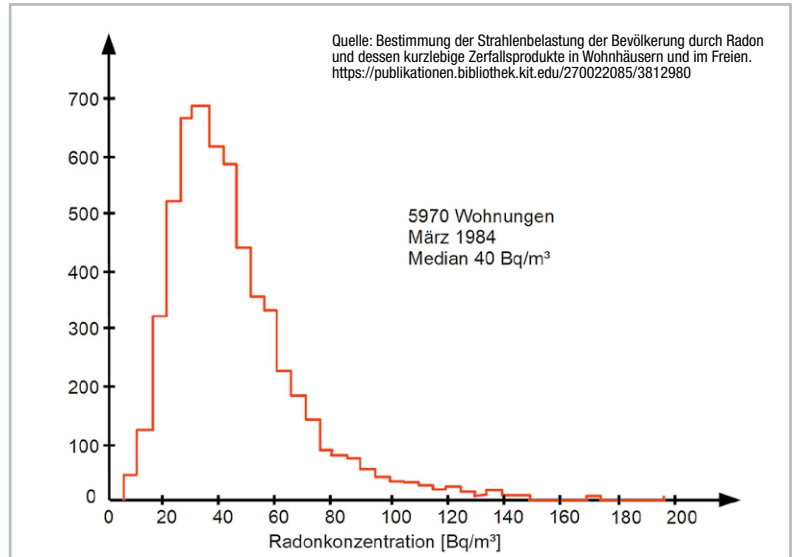


Bild 8: Die Mehrzahl der Messungen in deutschen Wohnungen ergab Radonkonzentrationen um 40 Bq/m³.

war deshalb mit den Mitteln der damaligen Zeit nicht erkennbar. Selbst die für Schadgase hochempfindlichen Kanarienvögel, die von Bergleuten bis in die 1980er-Jahre zur Alarmierung beim Auftreten lebensbedrohender Gaskonzentrationen in die Grube mitgenommen wurden (Bild 7), nahmen Radon nicht wahr.

Seit die Bergwerke ab der Mitte des vergangenen Jahrhunderts aufgegeben wurden, dringt die radonhaltige Luft aus den alten, unbelüfteten Schächten verstärkt in die darüber liegenden Häuser ein. Besonders in historischen Gebäuden mit porösen Bruchsteinkellerwänden und gestampften Böden können sich schwer zu beseitigende Konzentrationen von mehr als 10.000 Bq/m³ einstellen.

Gesundheitliche Folgen

Erst in den 1950er-Jahren wurde der Zusammenhang zwischen Radon in der Atemluft und Lungenkrebs erkannt. Dabei stellt das Radon selbst eine nur geringe Gefahr dar, weil es nach dem Einatmen nicht dauerhaft in der Lunge verbleibt, sondern wieder ausgeatmet wird. Zudem zerfällt vom eingeatmeten Radon in der Lunge wegen seiner geringen Verweilzeit und seiner vergleichsweise langen Halbwertszeit nur wenig. Anders ist dies mit den ebenfalls radioaktiven kurzlebigen Zerfallsprodukten (Polonium 218, Blei 214, Bismut 214 und Polonium 210). Sie verbleiben, angelagert an Stäube und Aerosole, auf dem Lungengewebe und können in unmittelbarer Nähe der Zellen an deren Erbgut (DNA) ihr zerstörerisches Bestrahlungswerk mit α -Teilchen beginnen, das mit hoher Wahrscheinlichkeit mit Lungenkrebs endet. Radon ist heute nach dem Rauchen die zweithäufigste Ursache für bösartige Lungentumore.

Eine bundesweite Studie aus dem Jahr 1984 unter Federführung des KfK (Kernforschungszentrum Karlsruhe, 2006 in das KIT (Karlsruhe Institute of Technology = Universität Karlsruhe) übergegangen) ergab die in Bild 8 gezeigte, bundesweit ermittelte Radonkonzentration in 5970 Wohnungen. Danach liegt die Mehrzahl der Messungen im Bereich um 40 Bq/m³, dennoch gibt es lokal stark erhöhte Abweichungen, die nicht leicht genommen werden dürfen. Der Untersuchung zufolge liegt das Lungenkrebsrisiko im Mittel aufgrund der Radonexposition für Nichtraucher bei knapp 0,1 % und für Raucher bei 0,25 %. Für die Gesamtbevölkerung ergibt sich ein mittlerer Wert von nahezu 0,2 %. Bild 9 fasst das Gesagte zusammen.

Ursache (Bq) und Wirkung (Sv)

An dieser Stelle scheint es wichtig, auf die Unterscheidung zwischen der Ursache von ionisierender Strahlung und ihrer Auswirkung auf biologische Organismen hinzuweisen. Während die physikalische Ursache in



der in Becquerel (Bq) gemessenen Radioaktivität zu sehen ist, wird ihre Wirkung durch die in Sievert (Sv) gemessene Strahlendosis beschrieben. Die Erklärung der Einheit Bq ist einfach: 1 Bq = 1 Atomkernzerfall pro Sekunde. Beim Sievert ist es komplexer, weil die biologische Strahlungswirksamkeit von der Strahlenart, ihrer Intensität, den Eigenschaften der betroffenen Organe und dem zeitlichen Verlauf der Exposition abhängt.

Der schwedische Mediziner, Physiker und Begründer des Strahlenschutzes Rolf Sievert (1896–1966) (Bild 10) hat über die Analyse der Strahlenbelastung biologischer Organismen und die Bewertung des damit verbundenen Strahlenrisikos geforscht. Er fand heraus, dass die Basisgröße der Bestrahlung „Energie pro kg“ (Energiedosis in Joule/kg) mit dimensionslosen, die Strahlen- und Gewebeart berücksichtigenden Wichtungsfaktoren zu multiplizieren ist, um vergleichbare Aussagen zu deren biologischer Wirksamkeit bzw. ihrem Schädigungspotenzial machen zu können. „Organdosis“ und „effektive Dosis“ sind solchermaßen gewichtete Strahlendosen.

Radon in Wohngebäuden

Systematische Untersuchungen ergaben, dass sich Radon besonders in den Kellerräumen von Gebäuden zu hohen Konzentrationen akkumulieren kann. Ihren Weg in das Gebäude findet die radonhaltige Bodenluft des angrenzenden Erdreichs über Undichtigkeiten von Kellerböden und -wänden, um sich dann weiter mit abnehmender Konzentration in die oberen Stockwerke zu verteilen (Bild 11).

Radon ist mit einem spezifischen Gewicht von $9,73 \text{ g/m}^3$ etwa 7,5 Mal schwerer als Luft ($1,29 \text{ g/m}^3$). Dadurch füllt sich ein unventilierter Kellerraum mit radonhaltiger Bodenluft stetig auf und verdrängt die radioaktiv unbelastete Kellerluft in die höher gelegenen Wohnräume. Dabei ist man Radon jedoch nicht hilflos ausgeliefert: Es lässt sich mit geeigneten Messgeräten leicht feststellen und durch bauliche Maßnahmen aus Gebäuden fernhalten bzw. reduzieren.

Es soll nicht verschwiegen werden, dass Radon auch aus dem Grundwasser über das Leitungswasser in ein Wohngebäude eindringt und bei dessen Nutzung beim Duschen, Wäschewaschen, Blumengießen, Trinken usw. ausfällt. Die Belastungswerte sind aber vergleichsweise gering und können bei den örtlichen Wasserwerken erfragt werden. Einzelheiten finden sich z. B. hier: <http://www.umweltinstitut.org/themen/radioaktivitaet/radioaktivitaet-und-gesundheit/natuerliche-radioaktivitaet/radioaktivitaet-im-trinkwasser.html>.

Radonmessung

Bei der Messung von Strahlenexpositionen durch Radon 222 kann man sowohl passive als auch direkt anzeigende aktive Geräte einsetzen. Beiden gemeinsam ist ein definiertes Messvolumen (Diffusionskammer), in welchem der Zerfall stattfindet und dabei von einem Detektor erfasst wird.

Passive Radonmessgeräte erfassen die α -Teilchenemissionen, die beim Zerfall von Radon in seine kurzlebigen, weiter zerfallenden Folgeprodukte entstehen, durch einen Kernspurdetektor (DIN 25706-1) in Gestalt einer Polycarbonatfolie (Fläche: 1–10 cm^2 , Stärke: 0,1 bis 1 mm). Diese integriert die α -Teilchenemissionen im Verlauf der Zeit durch latente Spuren, die von zertifizierten Labors mit chemischen Ätzverfahren

Bild 10: Der schwedische Arzt und Physiker Rolf Sievert hat die Wirkung radioaktiver Strahlung auf biologische Organismen erforscht.



sichtbar gemacht und ausgewertet werden können. Das Messergebnis hat folglich die Einheit $\text{Bq} \cdot \text{h/m}^3$.

Derartige Radonexposimeter liefern verlässliche Langzeitwerte von Radonkonzentrationen in Innenräumen, gegen deren Kurzzeitschwankungen sie völlig unempfindlich. Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Radonwerte erhält der Anwender nicht. Für einen glaubwürdigen Mittelwert empfiehlt sich eine Messdauer von zwölf Monaten, weil das den Sommer mit verstärkter und den Winter mit verminderter Raumlüftung berücksichtigt. Ein derartiges an Personen getragenes Dosimeter mit durch Einschläge von α -Teilchen gezeichnetem CR39-Kernspurdetektorfilm zeigt Bild 12 (Quelle: BfS, http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion-radon/messmethoden-radonmesstechnik.pdf?__blob=publicationFile&v=1).

Aktive Halbleiterdetektoren

Im Handel erhältliche Radonmessgeräte zur direkten Ablesung der Radonkonzentration, oft in Verbindung mit der Aufzeichnung der Messwerte (Datenlogger), beruhen meistens auf einem Halbleitersensor. Als

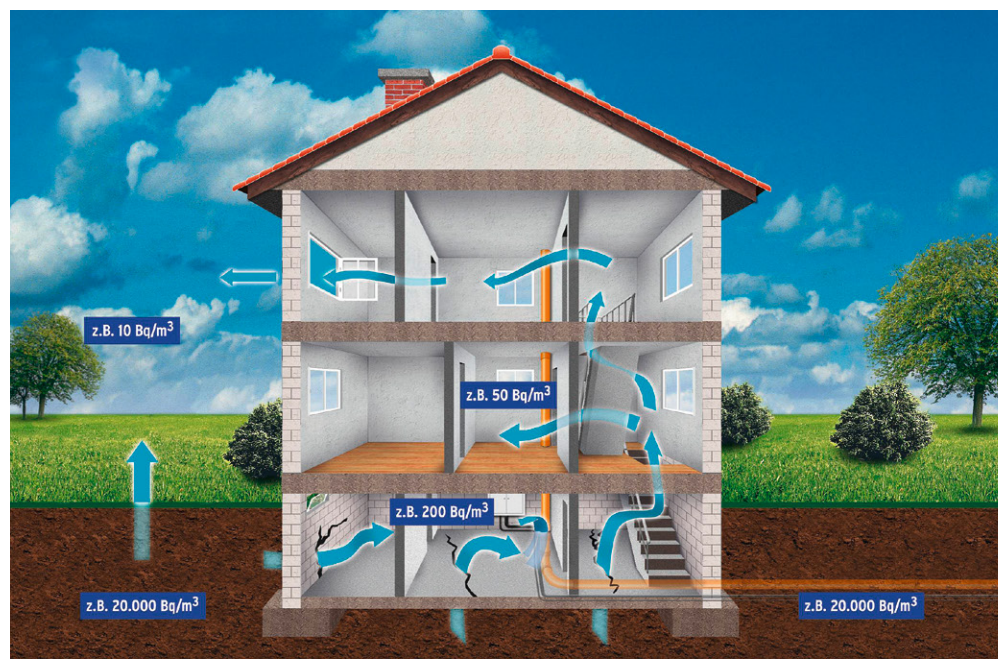


Bild 11: Die Radonkonzentration ist im Keller, wo das aus dem Erdreich kommende Radon ins Gebäude eindringt, am höchsten. In den oberen Geschossen verdünnt sich das radioaktive Gas zunehmend. (Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz)

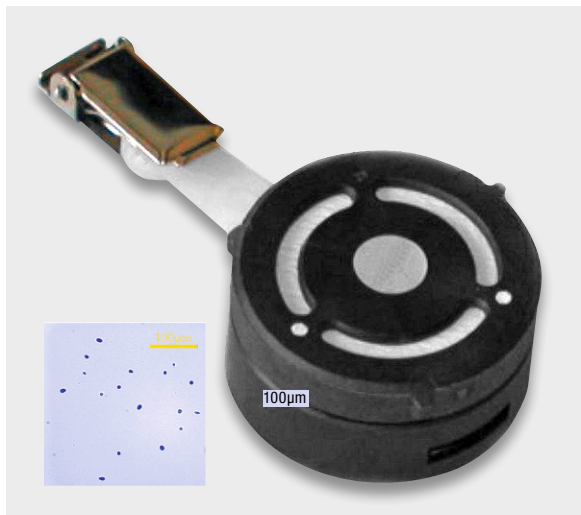


Bild 12: Ein Radondosimeter zeichnet die Spuren der Alphastrahlung auf einem Film auf, der zum Ende der Expositionsdauer von zertifizierten Labors ausgewertet wird.

aktive Geräte erfordern sie zum Betrieb eine elektrische Versorgungsspannung. Durch die Loggingfunktion ist die zeitliche Verteilung der Messwerte nachvollziehbar.

Um das Messprinzip des Radonhalbleiterdetektors verstehen zu können, muss etwas ausgeholt werden. Der einfachste Halbleiter ist die Diode mit einer Anode und einer Kathode (Bild 13). Sie ist für elektrischen Strom in Richtung Anode → Kathode durchlässig (Durchlassrichtung), in der Gegenrichtung sperrt sie den Stromfluss (Sperrrichtung). Elektronen als Träger negativer Elementarladungen bewegen sich im Durchlassfall gegen die technische Stromrichtung von der Kathode zur Anode, im Sperrfall überhaupt nicht.

Für die Detektion von α -Teilchen ist der Sperrfall interessant. Hier ergibt sich zwischen der p-dotierten Anodenhalbleiterschicht und der angrenzenden n-dotierten Kathodenhalbleiterschicht eine ladungsarme und deshalb isolierende Zone (Verarmungszone, depletion zone), die durch Vergrößern der angelegten Spannung aufgeweitet werden kann. Das ist zur Steigerung der Empfindlichkeit des Detektors sinnvoll,

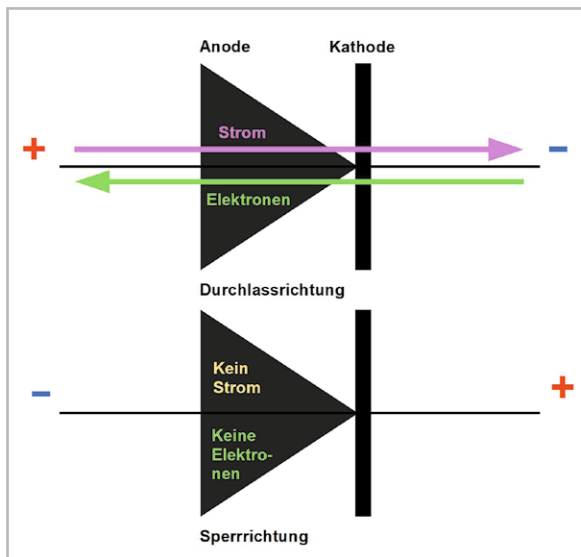


Bild 13: Ein Radondetektor ist im Prinzip eine in Sperrrichtung betriebene Diode.

weil das für die Strahlungsmessung aktive Volumen zunimmt. Zudem führt eine breitere Verarmungsschicht zu einer geringeren Kapazität für die Auswerteelektronik, wodurch sich das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert.

Wenn nun α -Teilchen durch die Verarmungszone fliegen, erzeugen sie entlang ihrer Spur infolge ihrer ionisierenden Wirkung paarweise Elektronen und Löcher (Defektelektronen). Diese werden, bevor sie wieder rekombinieren, von den jeweiligen Elektroden abgesaugt: die Löcher von der Kathode, die Elektronen von der Anode (Bild 14). Das erzeugt einen impulsartigen Abfall der Sperrspannung, der als Signal rauscharm verstärkt, ausgewertet und zur Anzeige gebracht wird.

Auswerteelektronik

Bild 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Auswerteelektronik. Damit die schwachen Ausgangsimpulse des α -Teilchendetektors nicht auf der Zuleitung zum Verstärker verloren gehen, erfolgt ihre Vorverstärkung in seiner unmittelbaren Nähe. Die energieproportionalen Impulse sind weder in ihrer Amplitude noch im zeitlichen Abstand konstant. Die daraus resultierende schwankende Amplitude des Detektors hängt zudem mit seinem Ansprechverhalten (detector response), Rauschanteilen in seinem Ausgangssignal und dem Eintrittswinkel der in die Verarmungszone einfallenden α -Teilchen zusammen. Der nicht exakt vorhersehbare Eintritt des Impulsereignisses ist eine Folge seines stochastischen Charakters.

Das verstärkte analoge Detektorsignal wird nun von einem A/D-Wandler digitalisiert und an einen Decoder geleitet. Dieser entscheidet, welches Zählregister einer Zählerbank inkrementiert werden soll. Die Zählerbank besteht aus N Zählregistern (Channels, $N = 256, 512, 1024 \dots$). Die gesamte auftretende Energiespanne wird in N Teilintervalle der Breite ΔE zerlegt, die den Zählregistern zugeordnet werden. Je nach seiner Stärke führt ein Impuls zum Hochzählen desjenigen Registers, in dessen Energieintervall er fällt. Im Ergebnis repräsentieren die Zählregisterstände die Häufigkeit, mit der ein bestimmtes Energieniveau der α -Teilchen registriert wurde.

Ein Komparator erzeugt im Zusammenwirken mit einer Zähllogik den dafür erforderlichen Zählimpuls. Im Ergebnis repräsentieren die Zählerstände die in einem gewissen Messzeitraum erfassten α -Teilchenenergien nach der Häufigkeit ihres Auftretens (Bild 16). Bei einer stationären, d. h. zeitlich unveränderlichen Strahlung, wird die entstehende Häufigkeitsverteilungskurve mit zunehmender Messdauer ständig genauer, weil sich Messausreißer immer geringer in der Ergebniskurve niederschlagen.

Eine andere Möglichkeit der Visualisierung des Radonkonzentrationsverlaufs besteht darin, die Messwerte chronologisch aufeinander fol-

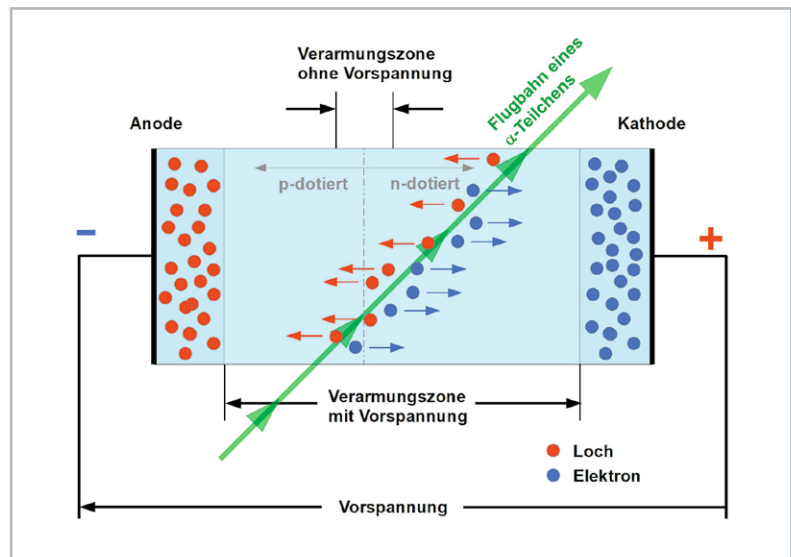
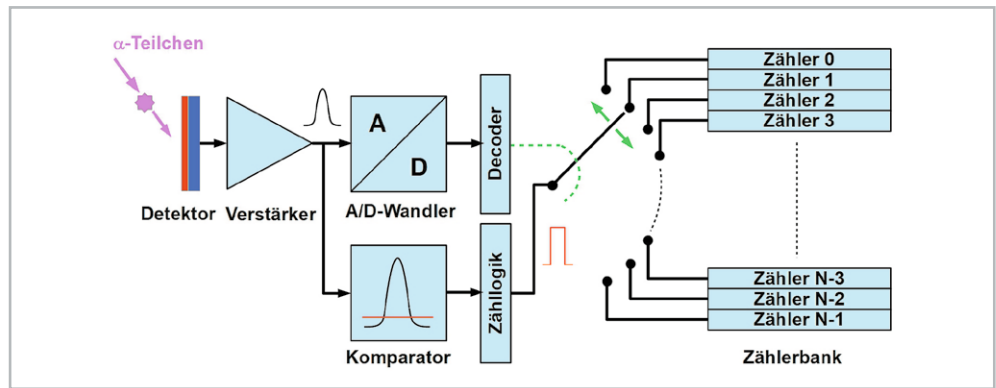


Bild 14: In der Verarmungszone des gesperrten Halbleiters erzeugen durchtretende α -Teilchen paarweise Elektronen und Löcher, die zu den jeweiligen Elektroden abgesaugt werden.



Bild 15: Ein Halbleitersensormessgerät wertet die energieproportionalen Spannungsimpulse des α -Teilchendetektors aus und speichert das Ergebnis in zugeordneten Zählregistern.



genden Messabschnitten zuzuordnen. Damit erhält man eine Kurve der Zerfälle über der Zeit.

Radonmessung in der Praxis

Aus der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Radonmessgeräte seien beispielhaft zwei herausgegriffen.

Testgerät 1

Es handelt sich um „Wave“, den „Smart Radon Detector“ der norwegischen Firma Airthings (ELV Bestell-Nr. CY-25 04 50). Auf der höchst informativen Airthings-Homepage lassen sich interessante Details über das ionisierende Edelgas Radon finden (<http://airthings.com/What-is-radon/>). So sterben nach Angaben der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) in den Vereinigten Staaten jährlich 21.000 Menschen an den Folgen von Kontakt mit Radon. Das sind knapp so viele Tote, wie sie zusammengerechnet auf die Konten „Alkohol am Steuer“ (17.400) und „Ertrinken“ (3900) gehen. Deshalb muss Radon als lebensbedrohendes Risiko messtechnisch erfasst, bewertet und bautechnisch minimiert werden.

Der Airthings-Wave-Radondetektor ist in einem weißen runden Kunststoffgehäuse mit 120 mm Durchmesser und 36 mm Stärke untergebracht und wiegt mit den beiden im Auslieferungsumfang enthaltenen 3000-mAh-Lithium-Batterien im Mignonformat (LR6/AA) 222 g (Bild 17). Damit soll laut Hersteller ein mindestens 18-monatiger Betrieb möglich sein. Die Anbringung an der Wand geschieht mithilfe einer Magnetplatte, von der sich das Wave bequem per Hand abnehmen lässt. Der Messbereich für die Radonkonzentration der Umgebungsluft erstreckt sich von 0 bis 50.000 Bq/m³.

Bereits als alleinstehendes Gerät kommuniziert der Wave-Detektor erstaunlich gut mit dem Nutzer. Eine alle 20 Sekunden aufblitzende Betriebsanzeigen-LED signalisiert über ihre Farbe den Zustand der Batterien und des Verbindungsstatus: Grün = Batterien okay, Blau = Bluetoothverbindung aktiv, Rot = Batterien wechseln. Ein zentraler Leuchtring wird durch einen Annäherungssensor berührungslos mit der

Hand aktiviert und gibt seine Informationen über die Ampelfarben Grün (Radonkonzentration okay), Gelb (Warnung) und Rot (Gefahr) preis. Im Bluetooth-Pairing-Modus läuft ein blaues Licht um, nach vollendetem Pairing blinkt der ganze Ring blau.

Seinen wahrhaft „smarten“ Funktionsumfang kann der Wave-Detektor im Zusammenwirken allerdings erst mit einem Android- oder Apple-Smartphone oder -Tablet entfalten. Der Test der Android-App „Airthings Wave“ auf einem Honor-8-Smartphone verlief problemlos. Nach der Installation der App und Eröffnung eines Kontos auf dem Airthings-Server im Internet standen nach einer kurzen Anlaufphase die ersten Messdaten über eine Bluetoothverbindung auf dem Smartphone sowie auf einem zugeordneten Dashboard auf jedem Display mit Internetzugang zur Verfügung. Dabei beschränkt sich das Wave nicht nur auf die zeitliche Aufzeichnung von Radon, sondern ergänzt diese um relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur (Bild 18). Bei der Über- oder Unterschreitung selbst definierbarer Grenzwerte wechseln die Farben der Messkurven und des zentralen Kreises zwischen Rot, Gelb und Grün. Das erleichtert die intuitive Bewertung der Messergebnisse ungemein.

Im zweiten Screenshot von links „Detailbildschirm Radon“ in Bild 18 fällt der schlagartige Anstieg der Radonkonzentration auf. Er ist die Folge einer Verlagerung des Wave-Messgeräts aus dem Büro des Autors im ersten Stock eines Wohnhauses in den zwei Kilometer Luftlinie entfernten, schlecht gelüfteten Gewölbekeller eines alten Bauernhauses mit gestampftem natürlichem Erdreich als Boden. Hier wurde neben einer konstant hohen relativen Luftfeuchtigkeit von 90 % und einer nahezu schwankungsfreien Lufttempera-

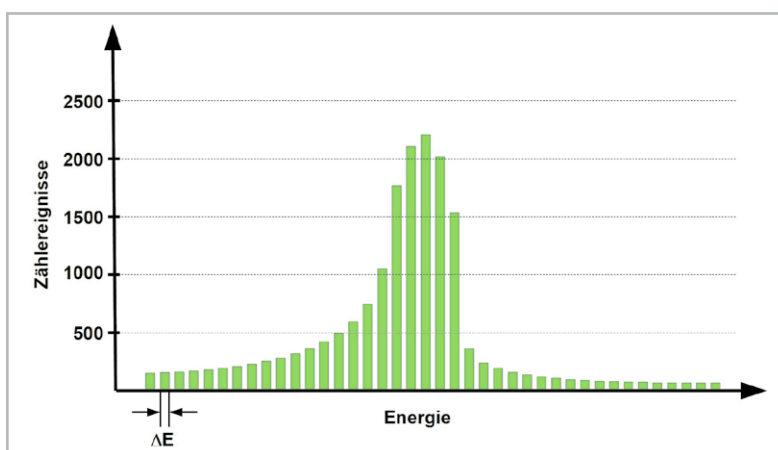


Bild 16: Die α -Teilchenenergien werden klassifiziert und als Häufigkeitsverteilung dargestellt.

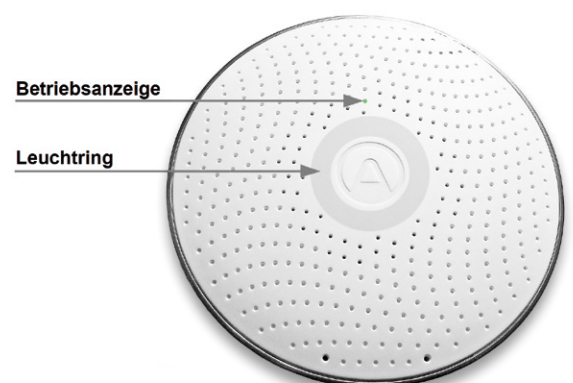


Bild 17: Der Airthings-Wave-Radondetektor wird erst im Zusammenwirken mit einer Handy-App und der Internetcloud zu einem wirklich „smarten“ Messgerät.

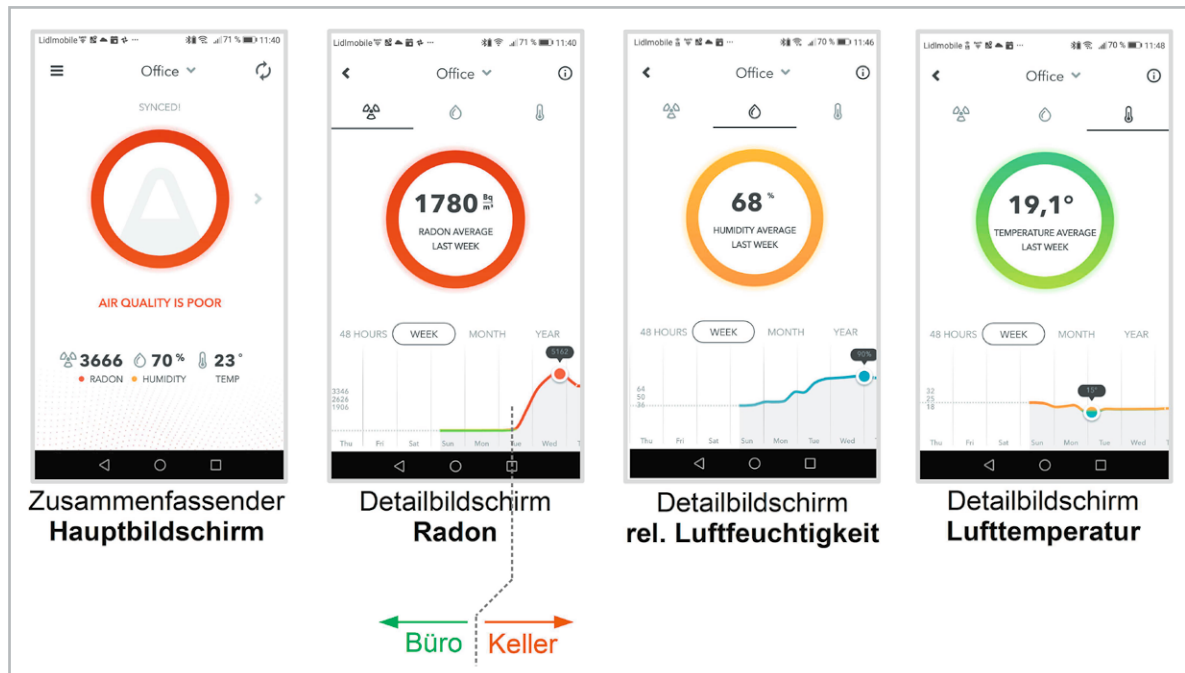


Bild 18: Airthings Wave überträgt die Messwerte per Bluetooth auf ein Smartphone, das sie über den Internetzugang auf den Airthings-Cloud-Rechner weiterleitet. Von hier lassen sie sich weltweit mit jedem Internetbrowser abrufen.

tur von 18 °C ein Radonspitzenwert von 5325 Bq/m³ erfasst. Wohnräume würde ein solcher Wert ohne Gegenmaßnahmen unbewohnbar machen. Ein Eindruck über die Risiken für Raucher und Nichtraucher gibt Bild 19. Bereits bei dem Radongrenzwert 300 Bq/m³ müssen etwa 6 von 1000 Nichtrauchern (jeder 167.) bis zum 75. Lebensjahr mit dem Tod durch Lungenkrebs rechnen, bei den Rauchern dagegen etwa 150 von 1000, immerhin jeder siebte.

Das Einloggen in das Airthings-Dashboard über das Internet ist mithilfe des beim Eröffnen des Airthings-Kontos festgelegten Passworts möglich. Hier sind in übersichtlicher Form aller Eigenschaften und Messwerte (grafisch und tabellarisch) der angemeldeten und dashboardfähigen Airthings-Geräte verfügbar. Bild 20 zeigt in Gestalt von drei Messkurven die zeitlichen Verläufe von Radonkonzentration, relativer Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur. Mithilfe eines verschiebbaren Messcursors kann jeder einzelne Messwert nach dem Zeitpunkt seines Auftretens und seiner Größe abgefragt werden. Auch hier fällt der drastische Anstieg der Radonkonzentration auf, der nach dem Verbringen des Geräts in den erwähnten Bauernhausgewölbekeller mit gestampftem Erdboden einsetzte. Nachdem das Gerät wieder in das Büro des Autors zurückkehrte, gingen die Extremkonzentra-

tionen erwartungsgemäß auf unbedenkliche Werte zwischen 20 und 30 Bq/m³ zurück.

Besonders nützlich ist die Möglichkeit des tabellarischen Exports der Messwerte im csv-Format (comma separated values) (Bild 21). Sie lassen sich dann z. B. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (Excel, Calc ...) editieren, grafisch aufbereiten und in Dokumentationen einbinden.

Zusammenfassung: Airthings Wave ist dank Datenlogger für Lang- und Kurzzeit-Radonkonzentrationen, für relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur und dank der erweiterten Analysemöglichkeiten durch App und Internetaccount für den technikaffinen Anwender und den Profi eine ausgezeichnete Wahl. Das Auslesen und Administrieren des Geräts über die Wave-App erspart ein Display und Bedientasten im Gerät, was trotz des gehobenen Leistungsumfang den überraschend günstigen Preis von ca. 200 Euro erklärt.

Testgerät 2

Das „Airthings Corentium Home“ (ELV Bestell-Nr. CY-25 04 51) im Format eines etwas dickeren Handys informiert mit seinem Flüssigkristalldisplay lediglich über Lang- und Kurzzeitdurchschnittswerte, die Länge des Messzeitraums und gibt über einen blinkenden Punkt in der oberen rechten Displayecke einen Aktivitätsnachweis (Bild 22). Der Langzeitmittelwert (long term average) wird über das laufende vollständige Messintervall (maximal ein Jahr) ermittelt, während der Kurzzeitmittelwert (short term average) zwischen dem stündlich aktualisierten Mittelwert des letzten Tages (1 day) und dem täglich aktualisierten Mittelwert der letzten sieben Tage wechselt.

Für den Corentium-Benutzer gibt es nur zwei Eingriffsmöglichkeiten über zwei mit einem spitzen Gegenstand zu bedienende versenkte Tasten in der Geräterückseite: eine für einen Geräteset und die andere für das sukzessive Abfragen des abgelaufenen Messzeitraums und den Zeitpunkt des letzten Resets. Damit stellt Corentium keinerlei Anforderung an das technische Verständnis seines Benutzers und nimmt nach dem Einlegen der Batterien und Abwarten einer Initialisierungsphase (die je nach vorliegender Radonkonzentration zwischen sechs und 24 Stunden dauern kann) selbsttätig den Messbetrieb in einem Radonkonzentrationsintervall von 0 bis 9999 Bq/m³ auf.

Wenn man eine Messung als abgeschlossen betrachtet und eine neue an einem anderen Ort beginnen möchte, sollte man vor dem Drücken der Resettaste in der Geräterückseite die Messwerte aus dem Display notieren, weil sie danach gelöscht sind. Das Gerät beginnt anschließend einen neuen Messzyklus.

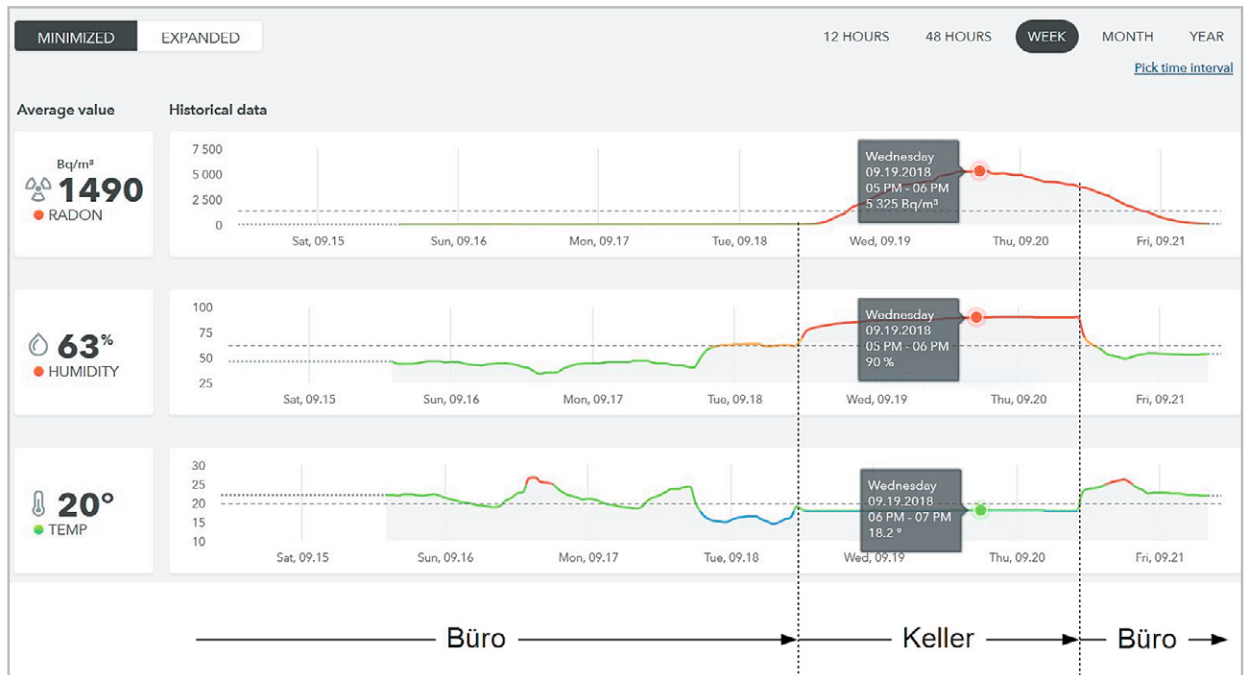
Sterblichkeitsrisiko bis zum 75. Lebensjahr für Nichtraucher und Raucher in Abhängigkeit von der Radonkonzentration		
Radonkonzentration [Bq/m ³]	Todesfälle pro 1000 Nichtraucher	Todesfälle pro 1000 Raucher
0	4,1	101
100	4,7	116
200	5,4	130
400	6,7	160
800	9,3	216

Quelle: Darby et al.: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. 2005
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC546066/>

Bild 19: Raucher haben in radonbelasteter Atemluft ein signifikant höheres Lungenkrebsrisiko als Nichtraucher.



Bild 20: Nach Einrichtung eines Kontos kann der Nutzer weltweit auf die Messergebniszusammenstellung seines Airthings-Wave-Detektors in Gestalt eines Dashboards (Armaturenbrett) zugreifen.



Zusammenfassung: Wer ausschließlich an einer Messung der mittleren Lang- und Kurzzeit-Radonkonzentration am Aufstellungsort des Geräts interessiert ist, erhält mit dem Airthings Corentium Home ein zuverlässiges Hilfsmittel. Wenn man bedenkt, dass für die Alternative eines passiven, nur einmal verwendbaren Radonexposimeters mit Auswertung durch ein zertifiziertes Messlabor mindestens 30 Euro zu veranschlagen sind, hat sich der Preis von etwa 200 Euro bereits bei sieben Messstellen amortisiert.

Fazit

Radongas erhöht als radioaktiver Bestandteil der Atemluft bereits in geringen Konzentrationen das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken. Um es abschätzen und geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, sind Messungen unumgänglich. Leichtsinn und Bedenkenlosigkeit können tödliche Folgen haben. **ELV**

	A	B	C	D
1	recorded	radonShortTermAvg (Bq/m3)	humidity (%)	temp (Å°C)
2	2018-09-15T12:19:03	0.0	46.5	22.0
3	2018-09-15T13:19:03	0.0	44.0	22.0
4	2018-09-15T14:19:03	0.0	44.0	22.0
5	2018-09-15T15:19:03	0.0	44.0	22.0
6	2018-09-15T16:19:03	0.0	44.5	22.0
7	2018-09-15T17:19:03	1.0	45.5	22.0
8	2018-09-15T18:19:03	1.0	46.5	22.0
9	2018-09-15T19:19:03	3.0	46.5	22.0
10	2018-09-15T20:19:03	3.0	46.5	22.0
11	2018-09-15T21:19:03	7.0	45.5	22.0
12	2018-09-15T22:19:03	10.0	46.0	21.0
13	2018-09-15T23:19:03	10.0	46.0	21.0
14	2018-09-16T00:19:03	10.0	44.5	21.0
15	2018-09-16T01:19:03	10.0	43.5	20.0
16	2018-09-16T02:19:03	10.0	43.0	20.0
17	2018-09-16T03:19:03	10.0	42.5	20.0
18	2018-09-16T04:19:03	12.0	43.5	19.0
19	2018-09-16T05:19:03	12.0	44.0	19.0
20	2018-09-16T06:19:03	13.0	44.5	19.0
21	2018-09-16T07:19:03	14.0	44.5	19.0
22	2018-09-16T08:29:42	1.0	44.0	21.0
23	2018-09-16T09:29:42	3.0	43.0	21.0
24	2018-09-16T10:29:42	5.0	41.0	23.0
25	2018-09-16T11:29:42	5.0	40.0	23.0
26	2018-09-16T12:29:42	5.0	36.5	27.0
27	2018-09-16T13:29:42	5.0	34.0	27.0
28	2018-09-16T14:29:42	5.0	35.5	26.0
29	2018-09-16T15:29:42	5.0	35.5	25.0

Bild 21: Für eigene Auswertungen kann man die Messdaten des Airthings Wave als csv-Listen herunterladen.

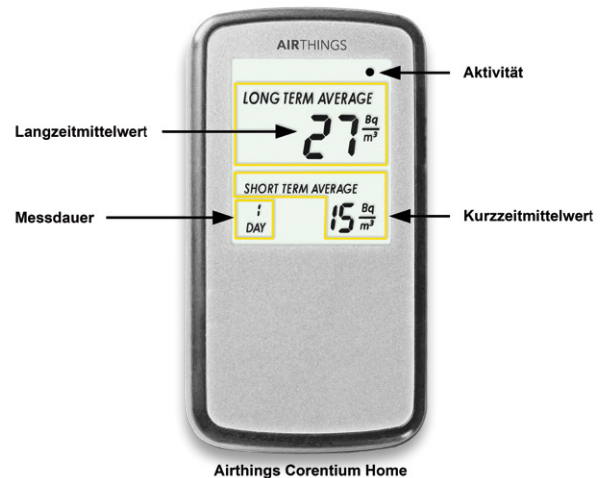


Bild 22: Mit dem Airthings Corentium Home ist die Ermittlung der Lang- und Kurzeitdurchschnittswerte der Radonkonzentration ohne Vorkenntnisse möglich.

Ausblick

Bevor das radioaktive Edelgas Radon zum Problemstoff in der Raumluft werden kann, sollte man es identifizieren und idealerweise schon bei der Gebäudeerrichtung am Eindringen hindern – Stichwort „radonsicheres Bauen“. Stellt man unzulässige Konzentrationen in Bestandsgebäuden fest, gibt es zahlreiche Lösungsansätze, um den Radonlevel auf ein unbedenkliches Maß zu reduzieren. Teil 2 des Artikels beschäftigt sich mit Vermeidung und Verringerung des von Radon in der Atemluft ausgehenden Risikos.