

1. Tagung

Radonsicheres Bauen

28. September 2005

HOCHSCHULE FÜR
TECHNIK UND WIRTSCHAFT DRESDEN (FH)

veranstaltet durch:

KORA e.V. Kompetenzzentrum für Forschung und
Entwicklung zum radonsicheren Bauen und Sanieren



HTW Hochschule für Technik
und Wirtschaft Dresden (FH)

ZAFI Zentrum für angewandte Forschung
und Technik e.V. an der HTW Dresden

Inhalt

Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig Eröffnung der Tagung und Vorstellung von KORA e.V.	3
Prof. Dr.-Ing. Hannes Neumann Grußwort	5
Staatssekretär Dr. Albrecht Buttolo Grußwort	7
Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Leißring Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und Böden Ursache und Ausbreitung	9
Dr. rer. nat. Walfried Löbner Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz Wie und warum gelangt Radon in ein Haus	23
Dr. rer. nat. Andreas Guhr Die Strahlenexposition der Bevölkerung beim Aufenthalt in Gebäuden Messtechnische Erfassung der Radonkonzentration	33
Dr. rer. nat. Eckard Ettenhuber Dipl.-Geophys. Rainer Lehmann Konzept zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte beim Aufenthalt in Gebäuden	39
Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig Baulicher Radonschutz im Neubau und Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden	47
Dr. rer. nat. Jürgen Conrady Gesundheitsgefahren infolge Radon im Ergebnis von Maßnahmen zur Energieeinsparung - Möglichkeiten der Prognose	61
Referentenverzeichnis.....	71





Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig
Hochschule für
Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
und Vorstandsvorsitzender KORA e.V.

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

ich begrüße Sie sehr herzlich zur „**ersten Tagung Radonsicheres Bauen**“ an der HTW Dresden. Veranstaltet wird diese durch das „Kompetenzzentrum für Forschung und Entwicklung zum radonsicheren Bauen und Sanieren – KORA e.V.“ in Kooperation mit der HTW Dresden (FH) und dem ZAFT e.V. an der HTW Dresden.

Wenn eine Veranstaltung als erste Tagung angekündigt wird, kann daraus geschlossen werden, dass hier ein Neubeginn gewagt wird, dass ein Thema, welches bisher noch nicht oder nur in geringem Maße behandelt wurde, verstärkt in das Interesse einer breiteren fachlichen Öffentlichkeit gebracht werden soll – oder gar muss. Die Ankündigung einer ersten Tagung schließt aber auch ein, dass weitere Tagungen folgen sollen, dass die Veranstalter davon überzeugt sind, sich einem Thema zu widmen, welches über die aktuelle Situation hinaus wichtig bleibt, ja möglicherweise an Bedeutung gewinnt.

Auf der heutigen Tagung stehen Fragen der Entstehung der Radonbelastung, der Eindringmechanismen radonhaltiger Luft in Gebäude und des Schutzes vor überhöhter Radonbelastung in Gebäuden genauso im Vordergrund wie die Frage, welche gesundheitlichen Risiken mit einer erhöhten Radonbelastung verbunden sind. Somit wird die Tagung ein weites Spektrum rund um das Edelgas Radon und seine Auswirkungen auf den Menschen abdecken. Einige der in diesem Feld zu stellenden Fragen sind – das werden die Vorträge zeigen – gut erforscht und können auf weitestgehend gesicherte Erkenntnisse zurückgeführt werden, bei anderen Fragen ist das derzeitige gesicherte Wissen noch lückenhaft und sind weitergehende Untersuchungen erforderlich. Viele Fragen, die sich mit der Radonbelastung und dem radonsicheren Bauen beschäftigen, können in der heutigen Veranstaltung nur angerissen oder müssen ganz auf eine spätere Veranstaltung verwiesen werden. Wenn im Ergebnis der Tagung trotz der hier genannten Einschränkungen neue Erkenntnisse für die tägliche Arbeit eines jeden Teilnehmers vermittelt werden können, wenn vor allen Dingen die Sensibilität gesteigert wird, Fragen des radonsicheren Bauens künftig stärker zu berücksichtigen, sind die Ziele dieser Veranstaltung erreicht worden.

Radonsicherer zu bauen erfordert sowohl beim Neubau als auch im Rahmen der Sanierung ein komplexes Herangehen. Hier sind neben den Bauingenieuren und Architekten auch Geologen, Messtechniker, Chemiker, Ärzte und noch viele weitere Fachleute gefragt. Diese zusammenzubringen und somit die Forschung sowie die praktische Umsetzung auf dem Gebiet des radonsicheren Bauens voranzubringen, ist ein Anliegen von **KORA e.V.** Neben der Forschung steht die umfassende Weitergabe des Wissens an Studenten, an Bauingenieure, Architekten und Energieberater, an die Vertreter der Kommunen und nicht zuletzt an betroffene Bürger im Mittelpunkt der Arbeit von KORA e.V.

Mit der heutigen Tagung tritt KORA e.V. zum ersten Mal als Veranstalter an die Öffentlichkeit. In der Hoffnung, mit interessanten Vorträgen, mit Diskussionen und mit der Knüpfung von Kontakten das radonsichere Bauen ein kleines Stück zu befördern, wünsche ich der Tagung viel Erfolg.

Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig

Vorsitzender von KORA e.V.



Prof. Dr.-Ing. Hannes Neumann
Rektor der Hochschule für
Technik und Wirtschaft Dresden (FH)

Grußwort von Prof. Dr.-Ing. Hannes Neumann zur 1. Tagung „Radonsicheres Bauen“ am 28.09.2005 in Dresden

Man sieht es nicht, man riecht es nicht und man schmeckt es nicht: Radon, ein radioaktives Zerfallsprodukt von Uran.

Aus allen Materialien, in denen Uran vorhanden ist, vor allem aus dem Erdboden und den Baumaterialien, wird Radon freigesetzt und gelangt als äußerst mobiles Gas in die freie Atmosphäre. Im Freistaat Sachsen treten auf Grund besonderer geologischer und bergbaulicher Bedingungen in weiten Teilen vergleichsweise hohe bis sehr hohe Radonkonzentrationen auf, welche die von der WHO empfohlenen Zielwerte der Radonkonzentration in Gebäuden zum Teil um ein Vielfaches überschreiten.

Jede Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen - Radon ist insoweit mit der natürlichen UV-Strahlung vergleichbar - bedeutet für die Menschen, die ihr ausgesetzt sind, ein allgemeines Lebensrisiko. Über die Auswirkungen von Radon auf die Gesundheit wird seit kurzem verstärkt diskutiert. Wird dieses natürliche, überall vorkommende Edelgas über einen längeren Zeitraum bei erhöhten Werten der Radonkonzentration eingeatmet, erhöht es - wie Dieselruß, Benzol oder Asbest - das Lungenkrebsrisiko.

Radongas steigt aus Gesteinen und Böden des Untergrundes durch Fugen zwischen Kellerwänden und Fundament, durch Risse in Fundament und Kellerwänden, durch Kabelschächte oder Rohrdurchführungen in jedes Gebäude und damit auch in Wohnungen und Arbeitsräume. Durch warme, im Haus aufsteigende Luft entsteht im Keller eine Sogwirkung. Dadurch wird kalte, radonhaltige Luft aus dem Untergrund in das Gebäude gesaugt. Über Treppen, Aufzüge oder Kaminschächte erreicht Radongas auch die höher gelegenen Geschosse. Bereits durchschnittliche Radonaktivitätskonzentrationen in der Bodenluft reichen schon aus, eine Erhöhung der Radonkonzentration im Gebäude zu bewirken. Dieser Effekt kann durch bautechnische Maßnahmen zur Energieeinsparung, wie sie in den vergangenen Jahren Standard geworden und vom Gesetzgeber mittlerweile auch vorgeschrieben sind, noch verstärkt werden. Außerdem werden bei Sanierungen von Altbestand häufig Maßnahmen ergriffen (z.B.: Einbau neuer Fenster), die im Einzelnen energietechnisch durchaus sinnvoll sind, jedoch insgesamt zu einer Erhöhung der Belastung mit Innenraumschadstoffen führen können.

Damit stellen sich die Fragen:

1. Durch welche Maßnahmen kann die Radonkonzentration im Haus reduziert werden?
2. Wie kann beim Neubau das Eindringen von radonhaltiger Bodenluft reduziert werden?

Mit der wissenschaftlichen Klärung dieser Fragen beschäftigen sich viele Forschungseinrichtungen der Hochschulen und Institute. Aber auch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit misst dieser Problematik zunehmend Bedeutung bei.

Folgerichtig wurde im Januar diesen Jahres das „Kompetenzzentrum für Forschung und Entwicklung zum radonsicheren Bauen und Sanieren – KORA e.V.“ gegründet. KORA e.V. hat sich zum Ziel gestellt, die vielfältigen Kompetenzen zum radonsicheren Bauen, die sich schwerpunktmäßig in Sachsen herausgebildet haben, zu bündeln, das vorhandene Wissen umfassend weiter zu geben und Forschungsvorhaben zur Weiterentwicklung des Wissens zu Radon und dem radonsicheren Bauen zu initiieren. Neben Hochschullehrern unserer Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) sind Vertreter weiterer Bildungs- und Forschungseinrichtungen sowie von Kommunen, Fachleute aus der Radonforschung und aus der Baupraxis Mitglieder des Vereins.

Als eine der ersten Aktivitäten wird von KORA e.V. gemeinsam mit dem Zentrum für angewandte Forschung und Technologie an der HTW Dresden (ZAFT e.V.) und unserer Hochschule die 1. Tagung Radonsicheres Bauen veranstaltet, zu der wir uns heute zusammengefunden haben. Vertreter aus Wissenschaft und Praxis werden in ihren interessanten Vorträgen neueste Erkenntnisse auf diesem Gebiet vermitteln.

Ich wünsche allen Teilnehmern einen deutlichen Wissenszugewinn zur Thematik radonsicheres Bauen sowie spannende Gespräche in den Tagungspausen.

Prof. Dr.-Ing. Hannes Neumann
Rektor



Dr. Albrecht Buttolo
Staatsministerium des Innern
Staatssekretär für Landesentwicklung,
Städtebau u. Wohnungswesen

Grußwort von Herrn Staatssekretär Dr. Buttolo zur 1. Tagung „Radonsicheres Bauen“ am 28.09.2005 in Dresden

Ein größeres Interesse der Bevölkerung hat in letzter Zeit dazu geführt, dass der Problematik erhöhte Radonbelastung größere Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Auf Grund der besonderen geogenen Gegebenheiten sowie des früheren Bergbaus ist der Freistaat Sachsen stärker als die meisten anderen Bundesländer von Fragen im Zusammenhang mit Radon betroffen. So treten zum Beispiel in den Regionen des ehemaligen Uranerzbergbaus, insbesondere in den Bergbauregionen im Erzgebirge um Schneeberg und Annaberg, die höchsten Radonbelastungen ganz Deutschlands auf.

Radon ist ein natürlich vorkommendes radioaktives Edelgas. Es ist farblos, geruchlos und geschmacklos und kommt überall in der Umwelt in unterschiedlichen Konzentrationen vor. Als Zwischenprodukt der Zerfallsreihe des in der Erdkruste enthaltenen natürlichen Radionuklids Uran-238 entsteht über Radium-226 das radioaktive Edelgas Radon-222. Da Radon mit anderen Elementen keine chemischen Verbindungen eingeht, kann es aus allen Materialien, in denen Uran vorhanden ist, vor allem aus dem Erdboden, freigesetzt werden und somit in die freie Atmosphäre oder in die Innenraumluft von Gebäuden gelangen. Hohe Radonkonzentrationen können unter besonderen Umständen gesundheitsschädigend sein.

Das bedeutet aber nicht, dass unnötig Ängste geschürt werden, die erfahrungsgemäß oftmals zu einer Überschätzung der konkreten Gefährdung führen. Vielmehr sollten, wie es auch bisher in Sachsen getan wurde, die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des radongeschützten Bauens ausgewertet und den Fachleuten vermittelt werden.

Anhand der bisherigen in Sachsen gewonnenen Erfahrungen zeigte sich, dass sowohl bei der Sanierung bestehender Gebäude als auch beim Neubau ein umfassendes Fachwissen von Planern und Bauausführenden sowie eine gewissenhafte Bauausführung unerlässlich sind, um eine hohe Radonkonzentration in der Innenraumluft von Gebäuden zu reduzieren. Dieses Wissen gilt es verantwortlich weiter zu vertiefen und zu vermitteln.

Obwohl der Schwerpunkt der Tätigkeit von KORA e. V. in Sachsen angesiedelt ist, sollen somit die hier gewonnenen Erfahrungen auch über die Landesgrenzen hinaus wirken.

Die 1. Tagung zum radonsicheren Bauen ist ein weiterer Schritt, um die entsprechenden Fachkreise für diese Thematik zu sensibilisieren und unberechtigten Ängsten sowie Befürchtungen sachlich und fachlich zu begegnen. Insoweit wünsche ich den Initiatoren der Tagung viel Erfolg.



Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und Böden Ursache und Ausbreitung

Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Leißring

Einführung

Der Mensch ist unausweichlich in seinem Dasein natürlichen und künstlichen Strahlungsquellen ausgesetzt. Strahlung gehört zur Umwelt des Menschen und wird von ihm als etwas Selbstverständliches empfunden. Das Licht und die Wärme der Sonne als lebenspendendes Elixier oder auch Strahlung aus künstlichen Quellen, wie für Radio- und Fernsehempfang, sind allgegenwärtig.

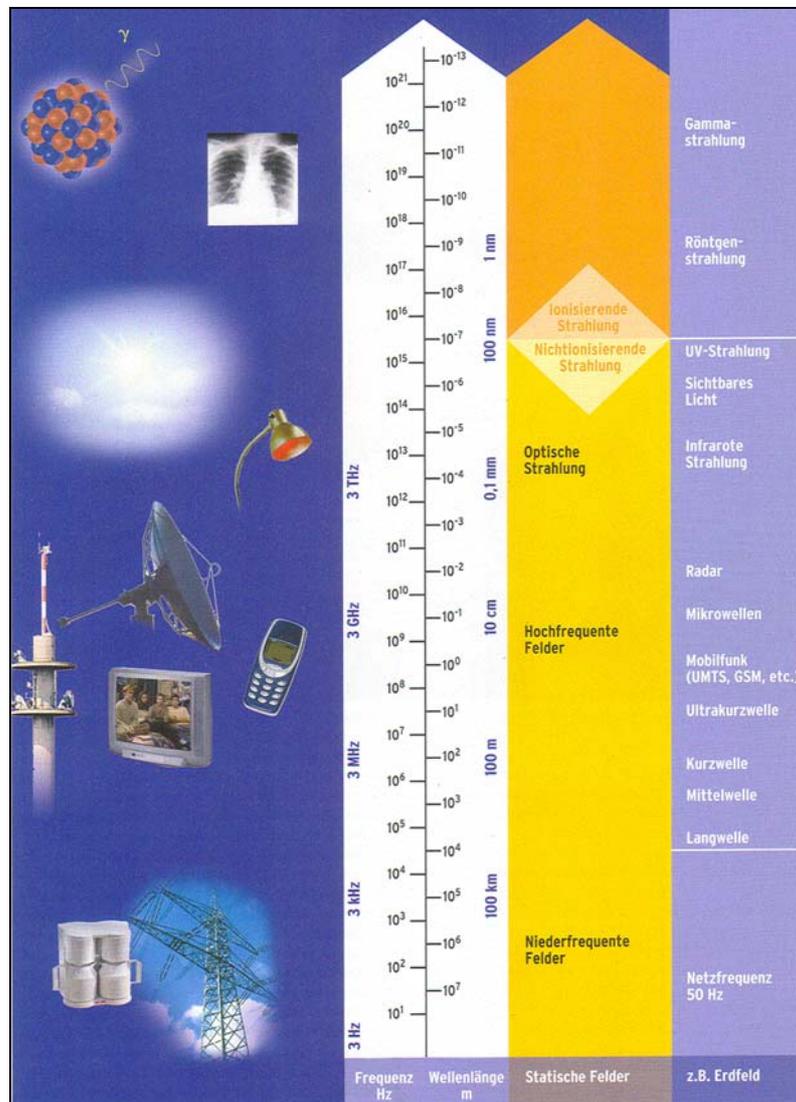


Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum [1]

Die Strahlungsarten als elektromagnetische Welle oder als Teilchenstrom unterscheiden sich in der mitgeführten Energie und damit auch in der Wirkung auf den Menschen.

Die elektromagnetischen Strahlungsarten werden nach ihrer Energie in **ionisierende Strahlung**, z.B. Röntgen- oder Gammastrahlung, die durch ihre hohe Energie bei der Durchdringung von Stoffen Ionisationsvorgänge auslöst, und in **nichtionisierende Strahlung**, wie Radio- und Mikrowellen, elektrische und magnetische Felder, deren Energie nicht ausreicht, um Atome und Moleküle zu ionisieren. Eine besondere Strahlungsart ist die **Teilchenstrahlung**, die wie die Gammastrahlung von radioaktiven Stoffen ausgesandt wird.

Als **Radioaktivität** wird die Eigenschaft von bestimmten Atomkernen bezeichnet, die sich ohne äußere Einwirkung von selbst in andere Kerne umwandeln und dabei ionisierende Strahlung aussenden.

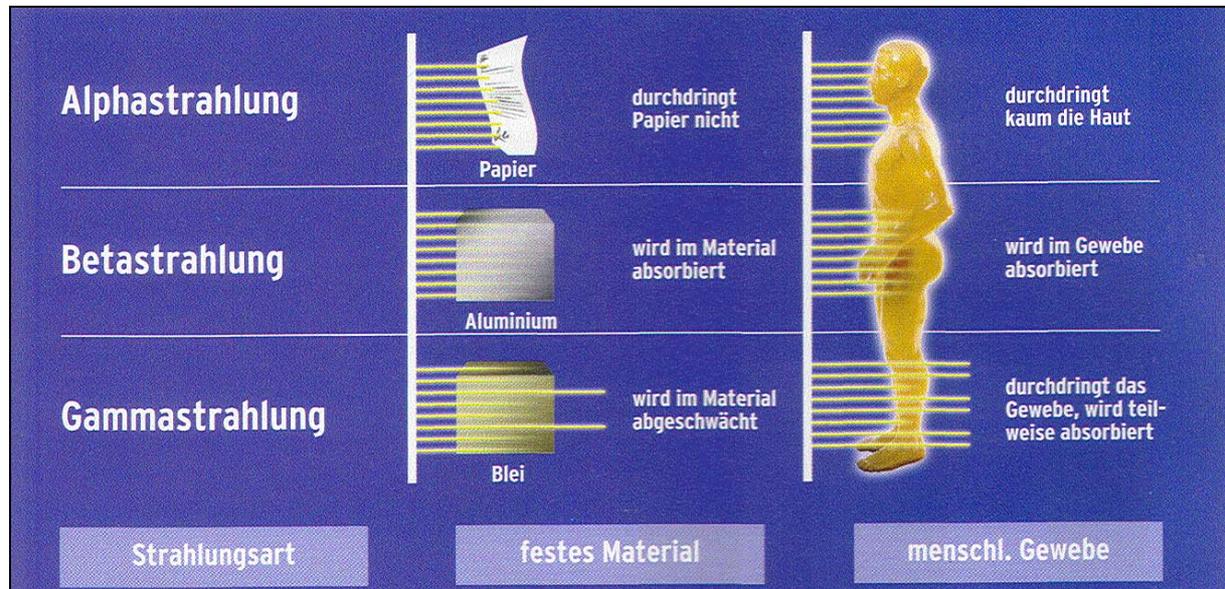


Abbildung 2: Durchdringung der verschiedenen Strahlungsarten [1]

Das Maß für die **Aktivität** eines radioaktiven Stoffes ist die Anzahl der pro Zeiteinheit in dem Stoff auftretenden Kernzerfälle. **1 Becquerell (Bq) = 1 Kernzerfall / Sekunde**

Als Beispiel soll ein Kilo(Liter) Wasser dienen, welches etwa 10^{29} Atome enthält. Wenn jede Sekunde eins davon zerfällt, dann hätte das Kilo Wasser eine Aktivität von 1 Becquerell. Dies sollte für die Einordnung der Größenordnung bedacht werden, wenn wir auf die Radioaktivität von Baumaterialien späterhin zu sprechen kommen. Die Anzahl der radioaktiven Atome in einer bestimmten Stoffmenge nimmt mit der Zeit durch den Zerfall in letztlich stabile Atome ab.

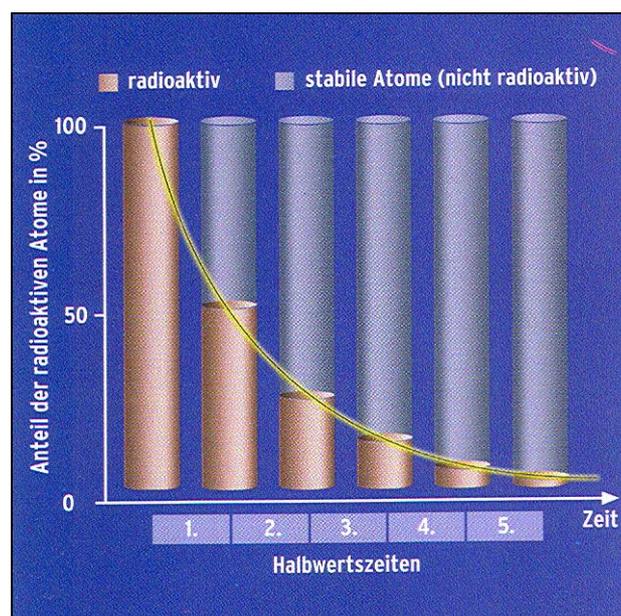


Abbildung 3: Halbwertszeiten [1]

Jedes Radionuklid hat eine eigene **Halbwertszeit**, die von Sekundenbruchteilen bis zu mehreren Milliarden Jahren dauert, wie zum Beispiel bei Uran -238 mit einer Halbwertszeit von 4,47 Milliarden Jahre.

Nach [2] sind heute etwa 2.720 verschiedene radioaktive Nuklide der 112 chemischen Elemente bekannt, 90 % sind instabil und die meisten technisch erzeugt. Nur wenige Radionuklide tragen zur **natürlichen Strahlenexposition** des Menschen bei. Auf der Erde sind natürlich zerfallende Atome, wie Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium und des Kaliums in Mineralien und als Spurenelemente in vielen Stoffen, wie auch in Baumaterialien und Böden aber auch in Lebensmitteln enthalten. Über Atemluft und Wasser nimmt der Mensch z. B. strahlendes Radon und Radonzerfallsprodukte auf. Schon hier muss auf die besondere Rolle des Radons, das im Gegensatz zu anderen Radionukliden ein radioaktives Edelgas ist und eine Halbwertszeit von 3,8 Tagen besitzt, hingewiesen werden. Durch seine hohe Migrationsfähigkeit kann es aus Gesteinen und Böden sowie aus Baumaterialien austreten und durch den Atemtrakt aufgenommen werden.

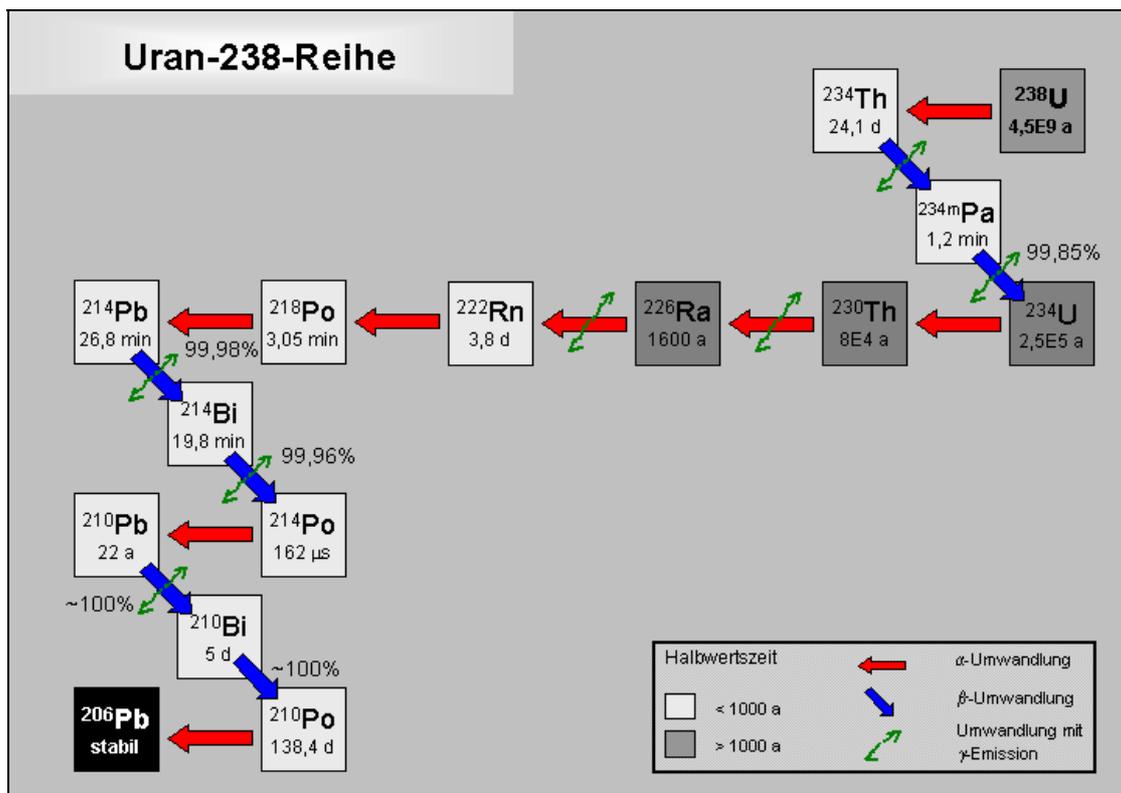


Abbildung 4: Zerfallsreihe Uran 238 [8]

Von Bedeutung für die natürliche Strahlenexposition der Menschen sind insbesondere die langlebigen Nuklide, die schon seit der Entstehung der Erde vor etwa 5 Milliarden Jahren existieren. Sie werden als **primordiale Nuklide** bezeichnet .

Von praktischer Wirkung der ionisierenden Strahlung auf den Menschen ist die Dosis. Die Strahlendosis wird an der Energiemenge, die durch die Strahlung auf eine bestimmte Materialmenge abgegeben wird, bemessen. Diese Dosis wird als **Energiedosis** bezeichnet. Sie wird in Gray gemessen.

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Joule} / \text{Kilogramm}$$

Die Energiedosis wird in Anbetracht der biologischen Wirksamkeit der jeweiligen Strahlungsart mit Hilfe von **Strahlungswichtungsfaktoren** präzisiert und als **Organdosis** oder **Äquivalentdosis** bezeichnet. Die Maßeinheit dafür ist das Sievert (Sv).

Organe und Gewebe	Faktor
Keimdrüsen	0,20
Knochenmark (rot)	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
Übrigen Organe und Gewebe	0,05

Abbildung 5: Tabelle der Strahlungswichtungsfaktoren und Gewebe-Wichtungsfaktoren [1]

Die Organdosis wird mit den so genannten **Gewebewichtungsfaktoren** multipliziert, die die stochastischen Wirkungen, die mit einer bestimmten, dosisabhängigen Wahrscheinlichkeit auftreten können, berücksichtigt. Dieser Wert wird mit **effektiver Dosis** bezeichnet und in Sievert angegeben.

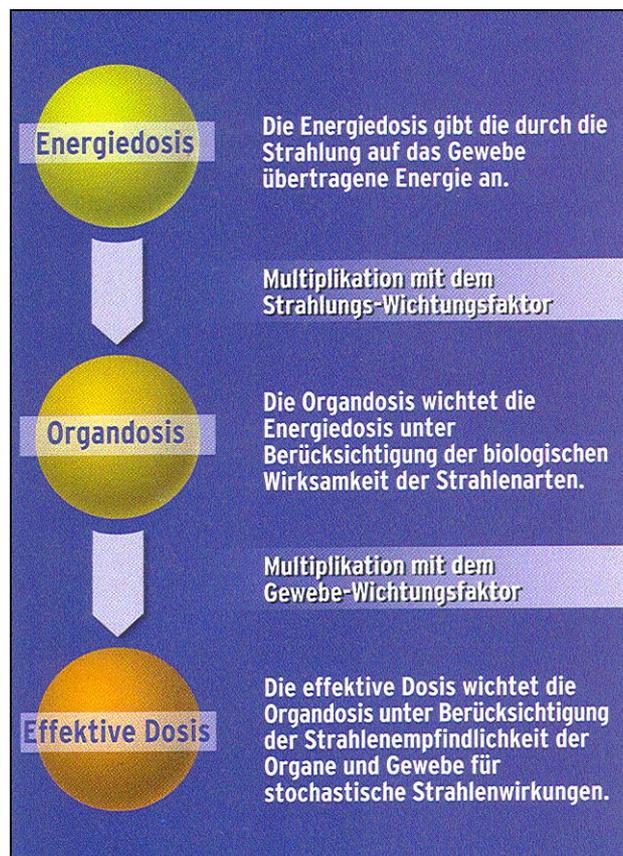


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Energiedosis und effektiver Dosis [1]

Organdosis und effektive Dosis werden als **Körperdosen** bezeichnet. Sie dienen zur Definition der Ziele, die im Strahlenschutz erreicht werden müssen [1].

So ist die effektive Dosis für beruflich strahlenexponierte Personen auf 20 mSv pro Jahr begrenzt. In den nachfolgenden Ausführungen soll deutlich gemacht werden, welche Berücksichtigung die standörtlichen Verhältnisse und Baumaterialien erfahren können und müssen, um die Strahlungsexposition der in einem Gebäude weilenden Menschen möglichst gering zu halten

Die **Dosisleistung** ist die Dosis in einer bestimmten Zeiteinheit (Gy/h bzw. Sv/h).

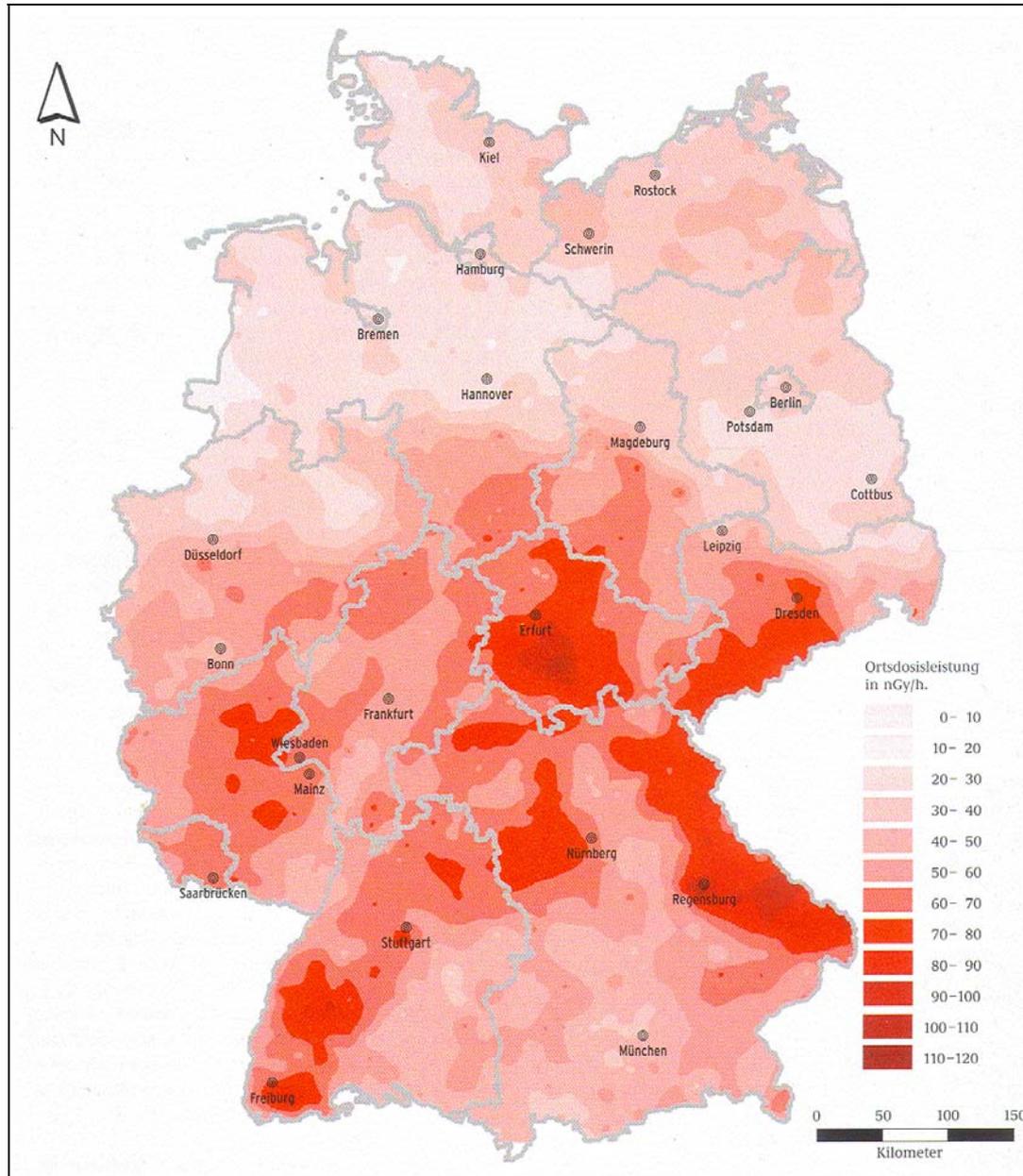


Abbildung 7: Dosisleistung der terrestrischen Strahlung in Deutschland [1]

Betrachtet man die Karte der Dosisleistungsverteilung der terrestrischen Strahlung, so fällt die Abhängigkeit von den geologischen Bedingungen auf. Dies ist begründet durch die unterschiedliche Verteilung der natürlichen Radionuklide in den Böden und Gesteinen der Erdkruste. Wo in Gebieten Gesteinsformationen (z.B. Granite) mit erhöhtem Gehalt an Uran vorkommen, können die auftretenden Dosisleistungen durchaus Werte von 150 nSv/h und höher betragen.



Abbildung 8: Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der BRD durch natürliche und künstliche Strahlungsquellen [1]

Jeder Mensch ist den unterschiedlichen künstlichen und natürlichen Strahlungsquellen je nach den individuellen Situationen ausgesetzt. So ist die Höhe der natürlichen Strahlenexposition maßgeblich von der standörtlichen Situation des Aufenthaltsortes abhängig. Also in dem hier zu behandelnden Fall von der Beschaffenheit der Böden und den aus radiologischer Sicht insbesondere von den relevanten baulichen Gegebenheiten in den Aufenthaltsgebäuden. Es ist leicht einsehbar, dass eine Minimierung der beeinflussbaren Strahlungsexposition das Risiko einer gesundheitlichen Schädigung senken kann und somit ein Beitrag zur Senkung der Wahrscheinlichkeit der gesundheitlichen Schädigung für die Bevölkerung erreicht werden kann.

Vorkommen von natürlichen Radionukliden in Mineralien und Gesteinen

Zurückkommend auf die in Abbildung 7 vorgestellten Verhältnisse der terrestrischen Strahlung wurde auf die Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen hingewiesen. Von der Vielzahl vorkommender natürlicher Radionuklide sind nur wenige auf Grund ihrer Konzentration und spezifischen Aktivität von praktischer Bedeutung. In nachfolgender Tabelle sind Beispiele von verschiedenen Bodenarten aufgelistet.

Bodenart	Herkunft	Spezifische Aktivität in Bq/kg		
		Ra-226	Th-232	K-40
Fränkischer Schiefer	Hof	30	60	1000
Kalkstein	Pfalz	< 8	10	< 40
Granit	Italien	40	60	900
Basalt	Hessen	30	20	400
Basalt	Pfalz	40	50	200
Basalt	Prag	50	30	400
Rohphosphat	Marokko	1800	20	700
Rheinsand	Speyer	20	10	400
Bimsstein	Neuwiecker Becken	70	70	1000

Abbildung 9: Tabelle Typische Aktivität natürlicher Radionuklide in verschiedenen Bodenarten (gerundet) [3]

Schon diese Aufstellung zeigt die mögliche Schwankungsbreite der Böden und am Beispiel der Basalte auch die Variationsbreite einer Gesteinsart. International liegen umfangreiche Untersuchungen zu den Vorkommen der natürlichen Radionuklide in den jeweiligen Böden vor. So sind in Abbildung 10 Böden aus Schweden charakterisiert.

Soil	Number of samples	Ra-226		Th-232		K-40	
		Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range
Gravel (Kies)	118	73	12 - 86	44	28 - 68	900	512 - 1160
Sand (Sand)	49	26	10 - 57	30	2 - 75	802	628 - 1163
Silt (Schlick)	35	31	15 - 66	31	5 - 64	841	465 - 961
Clay (Lehm)	78	64	30 - 123	77	30 - 100	1042	627 - 1178
Till (Geschiebemergel)	125	42	12 - 165	42	14 - 94	775	558 - 1147
Till with alum shale (Geschiebemergel mit Tonschiefer)	10	595	381 - 984	41	32 - 48	697	589 - 1174

Abbildung 10: Tabelle Typische Werte natürlicher Radionuklide in schwedischen Böden [9]

Prinzipiell ist der Radioaktivitätsgehalt kristalliner Festgesteine höher als in Sedimentgesteinen. Die auftretende terrestrische Strahlung ist infolge des unterschiedlichen Gehalts der Gesteine an natürlichen radioaktiven Stoffen durch den geologischen Untergrundaufbau und maßgeblich durch die an der Oberfläche anstehenden Gesteine geprägt. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Auftreten von Uran in den Gesteinen. Die praktische Wirkung auf die Strahlenexposition wird hier spezifisch durch das mobile Zerfallsprodukt Radon bewirkt, welches aus den Gesteinen migrieren kann und über die Atemluft durch die kurzlebigen Folgeprodukte die ausschlaggebende Wirkung zeigt. In Abbildung 11 wird dies schematisch dargestellt.

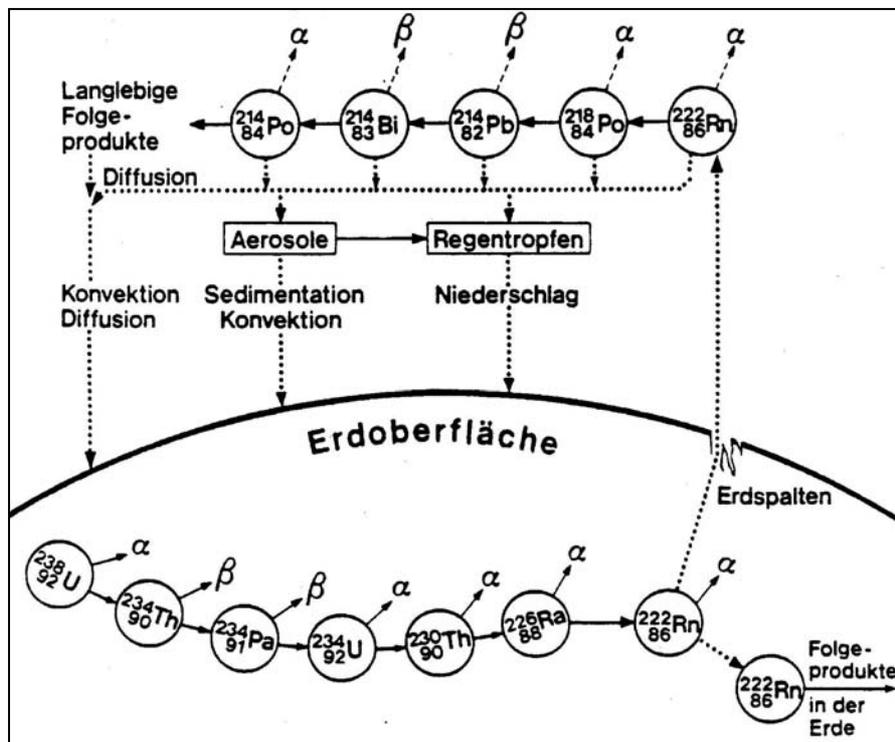


Abbildung 11: Bildung von Radon und Radonfolgeprodukten

Die spezifische Aktivität der Gesteine beruht letztlich auf dem Vorhandensein von Radionukliden in den Mineralien. An einer Zusammenstellung der Konzentrationen von Uran in Mineralien (Abbildung 12) soll dies verdeutlicht werden.

Mineral	Konzentration U-238 [ppm]		Spezifische Aktivität U-238 [Bq/kg]	
	Min.	Max.	Min.	Max.
dunkel (mafisch)				
Olivin	0,01		0,12	
Augit	0,01	40	0,12	496
Hornblende	1	30	12	372
Biotit	1	40	12	496
hell (felsisch)				
Muskowit	2	8	25	99
Plagioklas	0,2	5	2,5	62
Kalifeldspat	0,2	3	2,5	37
Quarz	0,1	5	1,2	62
akzessorisch				
Ilmenit	1	50	12	620
Magnetit	1	30	12	372
Epidot	20	50	248	620
Apatit	5	150	62	1.860
Allanit	30	700	372	8.680
Titanit	100	700	1.240	8.680
Monazit	500	3.000	6.200	37.200
Zirkon	300	3.000	3.720	37.200
Xenotim	300	35.000	6.200	434.000

Abbildung 12: Tabelle Konzentration von Uran in Mineralien

In Deutschland sind hohe Urankonzentrationen zum Beispiel im „Kirchberger Granit“ mit 20 ppm bekannt.

Aufgrund von besonderen standörtlichen geologischen Bedingungen, weisen einzelne Gebiete einen, über dem Durchschnitt liegenden Gehalt an radioaktiven Mineralien im Gestein auf, die zu erhöhten Strahlenexpositionen führen.

Dabei werden alle Gegebenheiten als „geogene Quelle“ bezeichnet, die geologischen Ursprung sind. Es können aber auch radioaktive Sedimente oder zur Oberfläche ausstreichende geologische Strukturen, wie Gänge und Flöze, als geogene Quellen in Frage kommen. Durch die Umlagerung des Gesteins im Laufe der erdzeitlichen Prozesse, kommt es zu Anreicherungen verschiedenster Art.

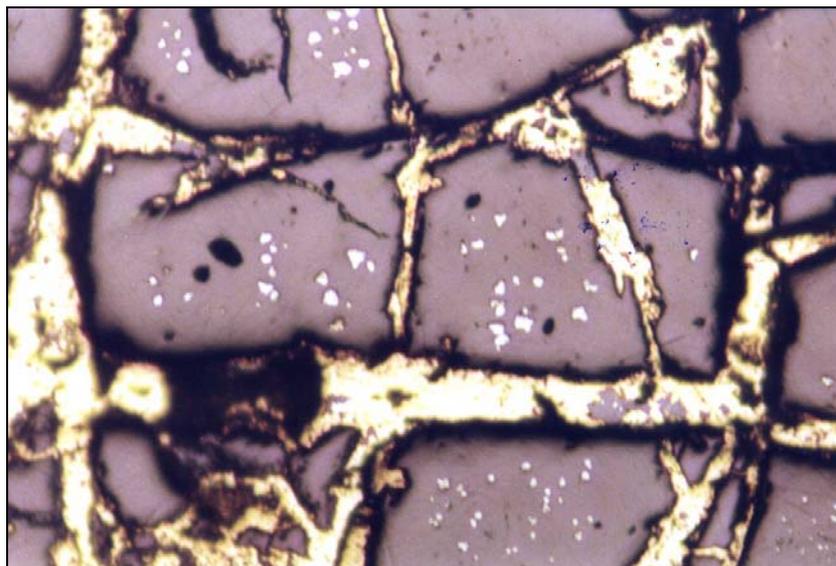


Abbildung 13: Ältere Pechblende mit höherem Anteil an eingeschlossenem radiogenem Blei (Galenit) und Ausfüllung der Risse durch Sulfide (Chalkopyrit, Pyrit, Sphalerit u.a.) in feinkristalliner Verwachsung. Anschliff einer kompakten Gangprobe mit schmaler Pechblendeader, Annaberg; sehr stark radioaktiv (MfN Berlin) Auflicht-Hellfeld; AM = 200 : 1, Ölimmersion

Dabei können sich zum Beispiel bergbauwürdige Erzlager, wie Pechblendevorkommen bilden. Zur optischen Verdeutlichung sollen zwei Beispiele von Gangstufen mit Pechblendeakzessorien aus dem Raum Annaberg-Buchholz dienen.

An normal abgeschiedener Pechblende lassen sich erzmikroskopisch aus der Menge des eingeschlossenen radiogenen Bleies, meist vorliegend in Form feinkristallinen Galenits, recht leicht Aussagen zum relativen Alter machen, ob eine ältere oder jüngere Pechblende vorliegt (Abbildungen 13 und 14).

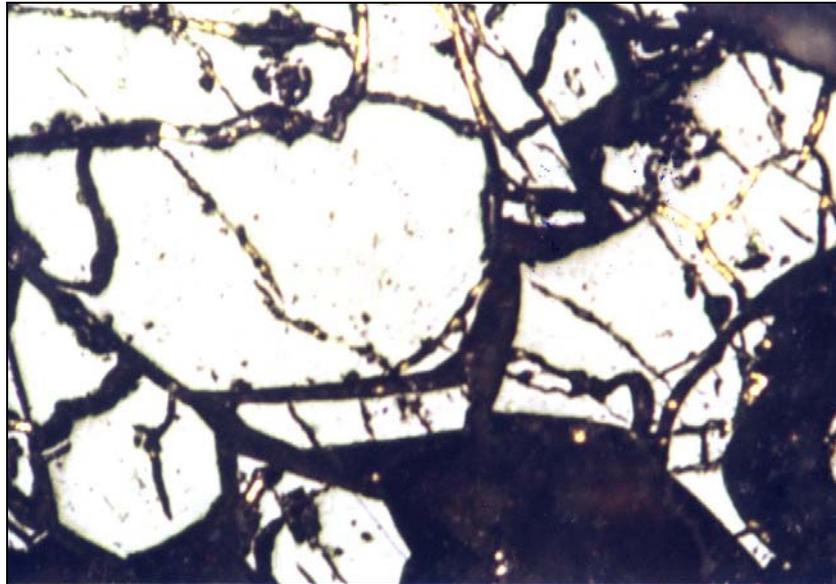


Abbildung 14: Jüngere Pechblende quasi ohne mikroskopisch sichtbare Einschlüsse von radiogenem Blei. Probe aus einer weißen Quarzgangstufe, Annaberg; stark radioaktiv Aufflicht-Hellfeld; AM = 200 : 1, Ölimmersion

In Abbildung 15 wird die Widerspiegelung der Mineralisation in den Gesteinstypen deutlich.

Gestein	Konzentration U-238			Spezifische Aktivität U-238			berechnet Dosisleistung in nSv/h		
	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.
Saure Magmatite	3,5	3	20	44	38	252	20	18	116
Intermediäre Magmatite	1,5	1	8	19	13	101	9	5,8	46
Basische Magmatite	0,8	0,5	1	11	4	13	45	1,7	5,8
Ultrabasite	0,05	0,01	0,1	1	0,1	1	0,3	0,1	0,6
Sandsteine	1,6	0,5	3	20	6	38	9	2,9	17
Tonsteine	3,7	1,5	8	34	25	101	21	8	46
Carbonate	1,8	0,3	2,3	23	4	29	10	1	13
Rezente Tiefseetone		0,2	4		3	50		1,2	23
Bauxite	11,4	2	27	144	25	340	66	12	157
Schwarzschiefer		3	1.200		38	15.120		17	6.960
Phosphate		50	900		63	11.340		290	5.220
Krustenmittel	2,5			32			14		
Böden	3,2	1	20	40	13	252	19	5,8	116

Abbildung 15: Tabelle Konzentration von Uran in Gesteinen [11]

In den Bergbauregionen Sachsens, Thüringens und der ganzen Welt sowie an Uranerzlagerstätten sind neben den oben genannten geogenen Quellen meist auch anthropogene Quellen als zweite Belastungsart zu finden.

Zu den anthropogenen Quellen wird der Abraum aus dem Bergbau gezählt. Besonders zu nennen sind Halden und Absetzanlagen vom alten Silber- und Kobaltbergbau, dem Uranbergbau, Aschen und Schlacken aus dem uranhaltigen Kohle- und Kupferschieferbergbau und deren Deponien.

Die Halden des Erzgebirges können außer den hohen Gehalten an Uran und seinen Zerfallsprodukten auch Nickel-, Kobalt- und Arsenmineralisationen aufweisen.

Die Zusammenfassung von Komponenten der radiologischen Belastung von Gebäuden zeigt Abbildung 16.

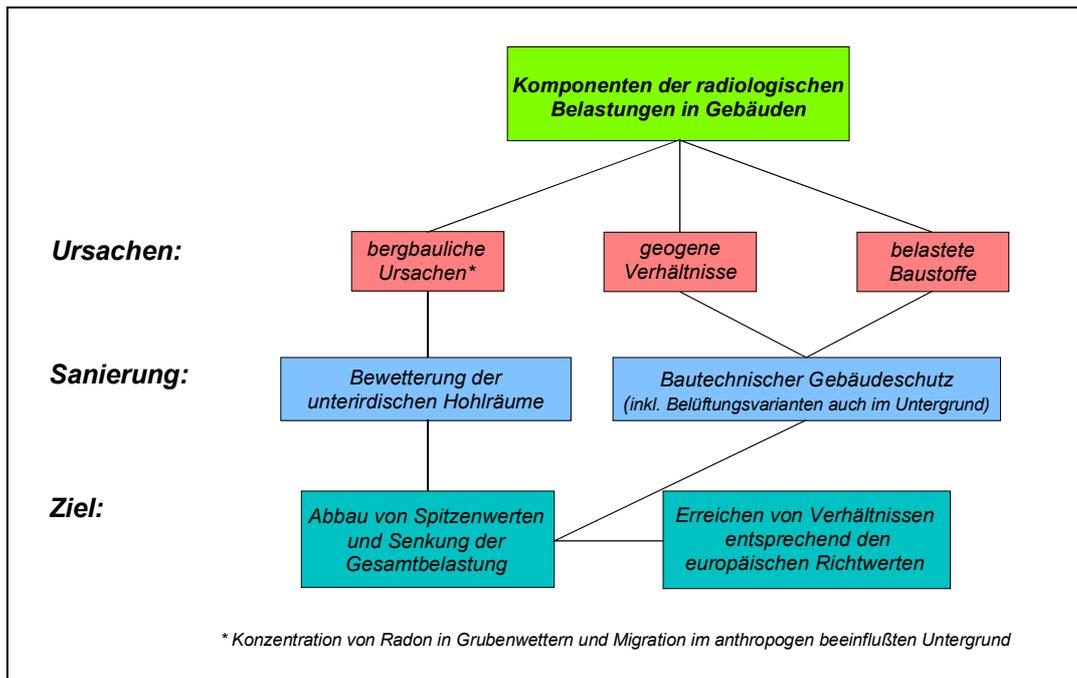


Abbildung 16: Komponenten der radiologischen Belastung in Gebäuden

Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien

Baustoffe enthalten meist einen gewissen Anteil an natürlich radioaktiven Stoffen. Insbesondere sind vor allem die Isotope Kalium 40, Radium 226 und Thorium 232 aus strahlenbiologischer Sicht von Relevanz. Die Exposition für sich in Gebäuden aufhaltenden Menschen wird verursacht von den aus den Baumaterialien ausgehende Direktstrahlung und von der in der Regel schwerwiegenderen Ursache des aus den Baustoffen freigesetzten Radons und seiner Zerfallsprodukte, die durch Einatmen der Luft im Gebäude in die Lunge des Menschen gelangen. Die Tabelle 12 gibt einen einführenden Überblick über einige Baustoffe bezüglich der Schwankungsbereiche der spezifischen Aktivität. Auf eine umfassende Zusammenstellung mit über 150 verschiedenen Baustoffen bei [10] sei hingewiesen.

Baustoffe	Kalium 40 [Bq/kg]		Radium 226 [Bq/kg]		Thorium 232 [Bq/kg]		Summen
	Mittelwert	Spannweiten	Mittelwert	Spannweiten	Mittelwert	Spannweiten	
Natursteine:							
Granit	1000	600-4000	100	30-500	80	50-200	0,79
Andere Erstarrungsge- steine	< 400	< 20-900	< 40	< 20-200	< 40	< 20-300	< 0,35
Tuff, Bims	1000	500-2000	100	< 20-200	100	30-300	0,86
Schiefer	900	500-1000	40	30-70	50	40-70	0,49
Kalkstein, Marmor	40	< 40-200	< 20	< 20-< 30	< 20		< 0,14
Sandstein, Quarzit	500	< 40-1000	< 30	< 20-< 70	< 30	< 20-70	< 0,30
Sonstige Natursteine	1000	< 40-2000	< 40	20-50	< 50	< 20-80	< 0,51
Mauersteine usw.:							
Ziegel, herkömmliche Art	600	100-2000	60	20-100	60	20-200	0,52
Kalksandstein, Gasbeton	200	40-800	< 20	< 20-80	< 20	< 20-60	< 0,51
Lichtbetonsteine:							
Zuschlag aus Bims	900	500-2000	80	20-200	90	30-300	0,75
Blähton, Blähschiefer	400	40-700	< 30	< 20-200	< 30	<20-60	< 0,28
Schlacke	500	300-1000	100	20-700	100	20-200	0,76
Ziegelsplitt	500	400-600	40	30-70	60	30-100	0,44
Beton:							
Normalbeton	370	150-500	< 20		< 20		< 0,21
Leichtbeton	1100	70-1600	30	<20-90	30	<20-80	< 0,43

Abbildung 17: Tabelle Natürliche Radioaktivität in Baustoffen [12]

Als Richtwert der EU für eine Prüfung der Exposition durch natürliche Radionuklide für die Bevölkerung wurde auf der Basis der Richtlinie 96/29 ein Wert von 1 mSv/a festgelegt. Speziell für Baustoffe wurde 1999 von der Europäischen Kommission empfohlen, eine zusätzliche effektive Dosis einer Person um höchstens 0,3 mSv/a noch zuzulassen. Werte über 1mSv/a sollen nicht akzeptiert werden. Als praktisches Prüfkriterium wird von [4] ein Aktivitätsindex I vorgestellt.

$$I = \frac{C_{Ra}}{300 \frac{Bq}{kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \frac{Bq}{kg}} + \frac{C_K}{3000 \frac{Bq}{kg}}$$

Für die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Natursteine wurde durch [4] die Größe des auftretenden Aktivitätsindex berechnet (Abbildung 19).

Material	Ra-226 in Bq/kg		Th-232 in Bq/kg		K-40 in Bq/kg	
	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	Bereich
Granit	100	(30 - 500)	120	(17 - 311)	1000	(600 - 4000)
Gneis	75	(50 - 157)	43	(22 - 50)	900	(830 - 1500)
Diabas	16	(10 - 25)	8	(4 - 12)	170	(100 - 210)
Basalt	26	(6 - 36)	29	(9 - 37)	270	(190 - 380)
Granulit	10	(4 - 16)	6	(2 - 11)	360	(9 - 730)
Kies, Sand, Kiessand	15	(1 - 39)	16	(1 - 64)	380	(3 - 1200)
Natürlicher Gips, Anhydrit	10	(2 - 70)	< 5	(2 - 100)	60	(7 - 200)
Tuff, Bims	100	(< 20 - 200)	100	(30 - 300)	1000	(500 - 2000)
Ton, Lehm	< 40	(< 20 - 90)	60	(18 - 200)	1000	(300 - 2000)

Abbildung 18: Tabelle Mittelwerte und Schwankungsbereiche der spezifischen Aktivität in Natursteinen deutscher Herkunft und Bau(roh)stoffen [4]

	Aktivitätsindex I		
	Min	Mittel	Max
Granit	0,39	1,27	4,56
Gneis	0,55	0,77	1,27
Diabas	0,09	0,15	0,21
Basalt	0,13	0,32	0,43
Granulit	0,03	0,18	0,35
Kies, Sand, Kiessand	0,01	0,26	0,85
Natürlicher Gips, Anhydrit	0,02	0,08	0,80
Tuff, Bims	0,38	1,17	2,83
Ton, Lehm	0,26	0,77	1,97

Abbildung 19: Tabelle Aktivitätsindex von Gesteinen und Baurohstoffen (Daten nach Abb. 18).
Grau hinterlegt: I > 0,5 [4]

Es zeigt sich, dass der Aktivitätsindex durchaus Werte zwischen 0,5 und 1 durchaus vorkommen können. Eine sichere Beurteilung der Wirkung der einzusetzenden Baumaterialien müssen auf der Basis einer praktikablen Dosisabschätzung für die spezifischen Einsatzbedingungen und der gewählten Bauweise auch bezüglich eines geplanten Radonschutzes ermittelt werden. Auch muss bedacht werden, dass in Deutschland zur Zeit noch keine Pflicht zur Angabe der spezifischen Aktivitäten der Baumaterialien, wobei zudem auch noch die Fragestellung der Größe der Radonfreisetzung aus dem verarbeiteten Baumaterial jeweils zu klären ist, gefordert ist.

Dabei spielt die Festlegung durch den Bauträger, welche für ein zu errichtendes Gebäude akzeptabel ist für den Planer und Begutachter eine Hauptrolle. Folgt man den in [13] gegebenen Informationen stellen die auf der Basis von über 1.500 untersuchten Proben ermittelten Werte bei den in Deutschland üblicherweise verwendeten Baustoffen in der Regel keine signifikante erhöhte Belastung dar.

Es sollte dennoch im Einzelfall eine kritische Beurteilung Bestandteil der Planung sein. Insbesondere sollten spezielle Baustoffe, deren Bestandteile nicht eindeutig bekannt sind, einer Kontrolle unterworfen werden.

Zusammenfassung

Einleitend wird ausführlich auf das Wesen der natürlichen Radioaktivität, die Arten der auftretenden Strahlung und die Wirkung auf den Menschen eingegangen. Ausgehend von den jeweils vorliegenden geologischen Bedingungen wird das Auftreten von natürlichen Radionukliden in Gesteinen und Böden, was sich in der Karte der Dosisleistung der terrestrischen Strahlung ausdrückt, vorgestellt. Das Vorkommen von natürlichen Radionukliden in Mineralien wird erläutert und der Radioaktivitätsgehalt von Gesteinen aus dem Auftreten insbesondere von Uran abgeleitet. Die sich daraus ergebende potentielle Möglichkeit des Auftretens von Radon aus diesen geogenen Quellen wird vorgestellt und die mögliche Wirkung der natürlichen Radioaktivität in Baumaterialien diskutiert.

Quellenverzeichnis

- [1] Bundesamt für Strahlenschutz:
Strahlung/Strahlenschutz.-
Bundesamt für Strahlenschutz, 2004
- [2] Phillipsborn v., H.:
Radioaktivität und Strahlungsmessung.-
Bayrisches Staatsministerium für Umwelt,
Gesundheit und Strahlenschutz, 2003
- [3] Volkmar, M.:
Radioaktivität und Strahlenschutz.-
Informationskreis KernEnergie,2003
- [4] Gellmann, R., Schulz, H.:
Radioaktivität in Baustoffen - Neue Anforderungen für den Planer.-
Planen und Bauen, VDI Verlag,2004
- [5] Leißring, B.:
Radon – Problem des Sächsischen Altberbaues.-
Tagungsband 1. Altbergbaukolloquium, Verlag Glückauf GmbH, 2001
- [6] Baumann, L., Kuschka, E., Seifert, T.:
Lagerstätten des Erzgebirges.-
Enke Verlag , 2001
- [7] Universität Oldenburg, Fakultät Physik.:
Natürliche Radioaktivität in Baustoffen.-
<http://www.physik.uni-oldenburg.de/Docs/puma/1609.html>, 2003
- [8] Technische Universität Freiberg,
Institut für Angewandte Physik
Bestimmung der Dosisleistung
http://www.physik.tu-freiberg.de/wwwan/q_abb3.html
- [9] Lars Mjones (Swedish Radiation Protection Institute)
The radon situation in Sweden.-
Tagungsband 13. Statusgespräch des BMU „Forschung zum Problemkreis Radon“
am 24./25.10.2000
- [10] Hauswald, I.:
Radonbelastung in Neubauten.-
Diplomarbeit HTW Dresden, 2004
- [11] Siehl, A.:
Umweltradioaktivität.-
Ernst und Sohn Verlag, 1996
- [12] Barkauskas, F.:
Beton-Atlas.-
Bau Verlag und Technik, 2002
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz
Natürliche Radionuklide in Baumaterialien.-
Infoblatt, 2005



Wie und warum gelangt Radon in ein Haus?

Dr. rer. nat. Löbner
Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz

1 Einführung

Seit Ende der 80er Jahre ist auch in Deutschland die Strahlenexposition des Menschen durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte in den Mittelpunkt vielfältiger Forschungsaktivitäten gerückt. Neuere Ergebnisse epidemiologischer Studien [1] belegen die Erhöhung des Lungenkrebsrisikos mit zunehmender Radonkonzentration in der Atemluft, die verstärkte Anstrengungen zur Verringerung des Gesundheitsrisikos rechtfertigen. Nach einer Stellungnahme der Strahlenschutzkommission zur Wirkung des Radons [2] ist ein statistisch signifikantes zusätzliches Lungenkrebsrisiko bei Radonkonzentrationen von 150 Bq/m^3 nachweisbar. Die Bewertung des Kenntnisstandes zum Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen wurde auch in der 199. Sitzung der Strahlenschutzkommission der Bundesrepublik Deutschland im April 2005 [3] aktualisiert.

Einen Überblick über die Variationsbreite der Radonkonzentrationen in der Raumluft von Gebäuden sowie in der Bodenluft eines Baugrunds und daraus resultierende allgemeine Empfehlungen zur Verringerung der Radonkonzentration in Wohngebäuden liefert das Radon-Handbuch Deutschland [4]. Wegen der sehr komplexen physikalischen Vorgänge, die den Transport des Radons vom Baugrund in die Häuser bedingen, sind jedoch pauschale Empfehlungen für Sanierungsmassnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration in Häusern nur in seltenen Fällen erfolgversprechend. Damit im Zusammenhang steht auch die Prognosesicherheit von bautechnischen Radon-Schutzmassnahmen. Dabei wird in der Bewertungspraxis häufig vereinfachend eine erhöhte Bodenradonkonzentration im Baugrund mit einem erhöhten Radonrisiko in neu zu errichtenden Gebäuden gleichgesetzt.

Für die Quantifizierung der Eigenschaften des Baugrundes hinsichtlich des Radontransportes und des Einflusses der Bauwerkskonstruktion und Gebäudeklimatisierung auf den Radontransport ist jedoch die Bestimmung von zusätzlichen Parametern erforderlich, wobei ingenieurtechnische Berechnungsverfahren und anerkannte komplexe Messverfahren noch keine einheitliche Anwendung gefunden haben. Die Tatsache, dass in der Mehrzahl der Fälle der konvektive Radontransport die dominierende Ursache für das Auftreten erhöhter Radonkonzentrationen in Innenräumen darstellt, fordert dafür speziell angepasste Radontransportmodelle sowie experimentelle Untersuchungsmethoden, die eine Erfassung des tatsächlichen Systemverhaltens ermöglichen und der Bestimmung der für die Prognoseberechnungen relevanten Messdaten dienen [5].

2 Radonverfügbarkeit, Radonmigration und Radoneintritt in Gebäude

Das Systemverhalten hinsichtlich des Radontransportes aus dem Baugrund in ein Gebäude wird durch verschiedene, gleichzeitig ablaufende Teilprozesse bestimmt. Die Radonverfügbarkeit resultiert einerseits aus der Generation von Radon durch den radioaktiven Zerfall von Radium in den Gesteinspartikeln des Untergrundes oder der Baumaterialien und andererseits aus der Emanation von Radon in den Porenraum, der durch die Gesteinseigenschaften und den Feuchtegehalt wesentlich geprägt wird. Die Radon-Migration infolge von Diffusions- und Konvektionsprozessen erfolgt entweder in den Poren des Bodens bzw. den erdberührenden Baumaterialien der Gebäudehülle oder durch Risse und Klüfte. Hinzu kommt der Radontransport aus den Innenräumen durch Luftaustausch mit der Außenluft.

Diese Teilprozesse finden in miteinander gekoppelten Kompartiments (Baugrund, Gebäudehülle, Baumaterial, Innenräume) statt, die durch entsprechende Modelle quantitativ beschrieben werden können.

2.1 Radongeneration im Lockergestein

Das Radon (Rn-222) wird durch den radioaktiven Zerfall des Mutternuklids Ra-226 in den Gesteins- bzw. Bodenpartikeln gebildet und gelangt über den Emanationsprozess in das Porenvolumen. Die Rn-Generationsrate G , die den Transport des beim radioaktiven Zerfall entstehenden Rn-222 in den Porenraum des Lockergesteins erfasst, ist durch

$$G = \lambda \frac{E \rho_B A_{\text{Ra-226}}}{\varepsilon_t} \quad (1)$$

gegeben, wobei

E	der Emanationskoeffizient,
ρ_B	die Bodendichte,
$A_{\text{Ra-226}}$	die spezifische Aktivität von Ra-226,
λ	die Zerfallskonstante von Rn-222,
ε_t	die Porosität des Bodens

sind. Die spezifische Aktivität $A_{\text{Ra-226}}$ und der Emanationskoeffizient E eines Bodens oder von Lockergestein können mittels Gammaskpektrometrie an entnommenen Proben experimentell bestimmt werden. Der Emanationskoeffizient E besitzt eine gesteinspezifische Korngrößenabhängigkeit und hängt u.a. auch stark von der Bodenfeuchte ab. Für die Bestimmung der Dichte und der Porosität stehen einfache bodenphysikalische Messverfahren zur Verfügung. Spezielle Untersuchungen mit der Gammaskpektrometrie ergaben, dass im Falle von Lockergesteinsaufschüttungen die Rn-Generationsrate G wesentlich von der Feinkornfraktion bestimmt wird. In der Abbildung 1 ist beispielhaft für einzelne Kornfraktionen i die Größe

$$\bar{Q}_i = \frac{E_i \cdot A_{\text{Ra-226}} \cdot M_i}{M}, \quad (2)$$

dargestellt, die der Rn-Generationsrate G proportional ist und in [6] als Radonquellstärke bezeichnet ist. Diese Größe ist auf die Gesamtmasse M normiert und zeigt an, welche Kornfraktion mit der Masse M_i den größten Beitrag zur Gesamtquellstärke liefert. Als zweite Größe ist in dieser Abbildung die Kornfraktionsmassenverteilung angegeben. Diese Abbildung illustriert, dass nahezu die gesamte Radonquellstärke auf die kleinste Kornfraktion zurückzuführen ist.

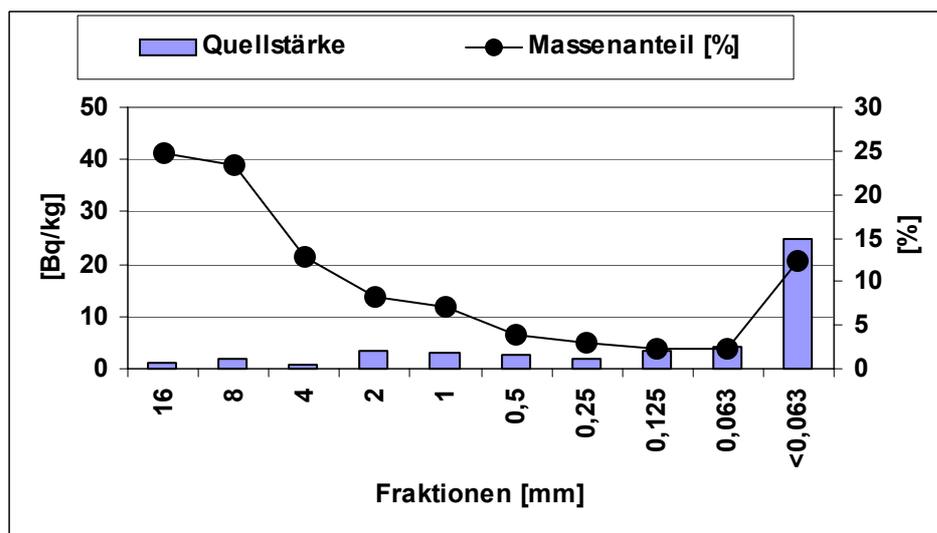


Abbildung 1: Rn-Quellstärke und Abhängigkeit von der Korngröße einer Aufschüttung

Durch die Rn-Generationsrate wird die Rn-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft bestimmt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in den Poren ein Mehrphasensystem vorliegt und Radon eine relativ gute Wasserlöslichkeit besitzt, die mit einem Verteilungskoeffizienten Feststoff-Wasser κ charakterisiert wird.

In einer Tiefe, die relativ groß gegen die Diffusionslänge von Radon im Boden ist, ergibt sich die Radonkonzentration zu

$$C_{\text{Rn-222}} = E \frac{\rho_B A_{\text{Ra-226}}}{\varepsilon_L + \kappa \varepsilon_W + K \rho_B}, \quad (3)$$

wobei

- ε_L die luftegefüllte Porosität,
- κ der Verteilungskoeffizient (Oswald-Koeffizient),
- ε_W : - die wassergefüllte Porosität des Bodens,
- K: der Radonadsorptionskoeffizient des Bodens bzw. von Bodenbestandteilen

sind.

Für die Abschätzung der Radonkonzentration im Boden eines Baugrundes ist, wie aus Gl. (3) ersichtlich, die Bodenfeuchte ein wichtiger Parameter. Sie kann durch eine direkte Probenahme oder auch mit einem In-situ-Messverfahren (TDR-Sonden, Mikrowellen-Sonden) ergänzend zu den Bodenradonmessungen ermittelt werden.

Die Radonkonzentration im Boden eines Baugrundes ist mit speziellen Bodensonden in Verbindung mit Radonmessgeräten einer direkten Messung zugänglich. Hierbei ist stets zu prüfen, ob in einer bestimmten Tiefe die dort anzutreffende Radonkonzentration im Boden mit der Rn-Generationsrate G des Feststoffes kompatibel ist. Durch diffusive bzw. konvektive Transportprozesse des Radons in der Bodenluft kann es zu einer signifikanten Veränderung der Bodenradonkonzentration an einem bestimmten Messort kommen, so dass Gl. (3) nur bedingt anwendbar ist. Hieraus resultieren häufig Fehlinterpretationen.

2.2 Radongeneration in Baumaterialien

Eine Radon-Generation findet nicht nur im Baugrund, sondern auch in den Baumaterialien des Gebäudes statt, die aus diversen Erdstoffen hergestellt werden und typischerweise eine mittlere spezifische Ra-226-Aktivität von bis zu 100 Bq/kg aufweisen können (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Mittelwerte und Schwankungsbereiche der spezifischen Ra-226-Aktivität in Natursteinen deutscher Herkunft und Baustoffen [7]

Material	Ra-226 in Bq/kg	
	Mittelwert	Schwankungsbereich
Granit	100	(30 - 500)
Gneis	75	(50 - 157)
Diabas	16	(10 - 25)
Basalt	26	(6 - 36)
Granulit	10	(4 - 16)
Kies, Sand, Kiessand	15	(1 - 39)
Natürlicher Gips, Anhydrit	10	(2 - 70)
Tuff, Bims	100	(< 20 - 200)
Ton, Lehm	< 40	(< 20 - 90)

Für typische Baumaterialien sind in der Tabelle 2 die zu erwartenden Radonkonzentration für einen Raum mit und ohne Luftwechsel für die jeweilig angegebenen minimalen und maximalen Exhalationsraten J der Baumaterialien zusammengestellt [8]. Die Berechnungen zeigen, dass ein minimaler Luftaustausch gewährleistet sein muss, damit die sich im Raum aufgrund der natürlichen Radioaktivität der Baumaterialien entwickelnde Radonkonzentration auf ein akzeptables Niveau reduziert werden kann. Das ist vor allem bei der Auslegung von Niedrigenergiehäusern zu beachten.

Tabelle 2: Berechnete Radonkonzentration für einen Raum mit und ohne Luftwechsel für die jeweiligen minimalen und maximalen Exhalationsraten der Baumaterialien [8]

	J [Bq/(m ² h)]	J _{min}		J _{max}	
		[Bq/m ³] (LW=0)	[Bq/m ³] (LW=0,2/h)	[Bq/m ³] (LW=0)	[Bq/m ³] (LW=0,2/h)
Beton	2 - 20	380	14	3799	140
Porenbeton	1 - 3	190	7	570	21
Ziegel, Klinker	1 - 10	190	7	1900	70
Natursandstein	1	190	7	190	7
Kalkstein	0,9 - 11	171	6	2089	77
Naturbims	0,6 - 6	114	4	1140	42
Hüttenschlacke	0,4 - 0,7	76	3	133	5
Naturgips	0,2	38	1	38	1

2.3 Radontransport in der Bodenluft des Baugrunds

Der Radontransport in der Bodenluft des Baugrunds wird hauptsächlich durch diffusive und konvektive Prozesse, den radioaktiven Zerfall und die Rn- Generationsrate bestimmt. Unter der vereinfachenden Modellannahme, dass der Baugrund als ein homogener poröser Körper beschrieben werden kann, lässt sich der Radontransport durch folgende partielle Differentialgleichung beschreiben (s. z.B. [9],[10]):

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C_B}{\partial z^2} + \frac{v}{n(\varepsilon_L + \kappa \varepsilon_W)} \frac{\partial C_B}{\partial z} - \lambda C_B + G \quad (4)$$

Hier bezeichnen C_B die Radonkonzentration in der Bodenluft, D_{eff} den effektiven Diffusionskoeffizienten und v die Konvektionsgeschwindigkeit. Zur Bestimmung der Abhängigkeit von D_{eff} von den Bodeneigenschaften kann auf umfangreiche experimentelle Untersuchungen zurückgegriffen werden [10], [11], wobei der effektive Diffusionskoeffizient mit zunehmender Wassersättigung signifikant abnimmt. In einem wassergesättigten Boden ist somit der diffusive Transport stark eingeschränkt. Bei den konvektiven Prozessen im porösen Medium Boden spielt die Darcy-Geschwindigkeit v des Bodengases

$$v = - \frac{(k_B + k_R)}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5)$$

die der Gaspermeabilität des Bodens k_B bzw. von Rissen und Klüften k_R und dem Druckgradienten am Übergang Boden-Gebäude direkt proportional ist, die entscheidende Rolle. Der Proportionalitätsfaktor ist durch die dynamische Viskosität der Luft ($\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) gegeben. Die Gaspermeabilität k_B ist ein wichtiger bodenphysikalischer Parameter und ist von der Bodenart, der Korngröße und der Wassersättigung der Poren abhängig. In der Tabelle 3 sind Permeabilitätswerte für einige wichtige Bodenarten aufgeführt.

Tabelle 3: Permeabilitäten einiger Bodenarten

Bodenart	Permeabilität in [m ²]
Ton	$< 10^{-16}$
Lehm	$10^{-15} - 10^{-13}$
lehmiger Sand	$10^{-13} - 5 \cdot 10^{-12}$
Sand	$5 \cdot 10^{-12} - 10^{-10}$
Kies	$> 10^{-10}$

Die mittlere Migrationslänge des Radons bei diffusiven und konvektiven Transport im Boden ergibt sich zu [12]

$$M = \frac{1}{\lambda} \left\{ \left[1 - \frac{C_0}{C_\infty} \right] \cdot \left[\frac{v}{2} + \sqrt{\frac{v^2}{4} + \lambda \cdot D} \right] + v \frac{C_0}{C_\infty} \right\}, \quad (6)$$

wobei C_0 die Radonkonzentration am Übergang Boden-Gebäude ist, die in der Regel gegenüber der in größeren Tiefen anzutreffenden Rn-Konzentration C_∞ vernachlässigt werden kann. Druckdifferenzen von etwa 10 Pa führen somit gemäß Gl. (6) zu Migrationslängen im Baugrund von mehreren Metern. Es zeigt sich, dass bei permeablen Böden die Größe der Gaspermeabilität k der entscheidende Parameter ist, der die Transporteigenschaften des Mediums bestimmt.

Der Zusammenhang zwischen Migrationslänge und Permeabilität k ist in der Abbildung 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nur bei Permeabilitäten eines Baugrundes von $k < 10^{-12} \text{ m}^2$ der diffusive Radontransport der dominierende Prozess ist.

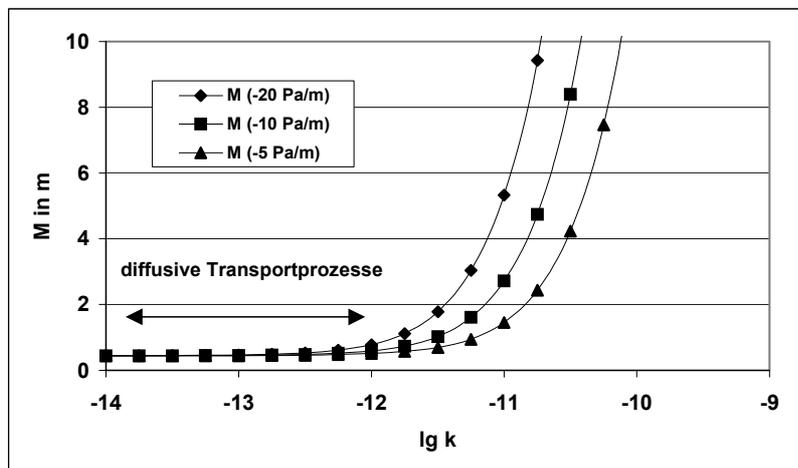


Abbildung 2: Migrationslänge in Abhängigkeit von der Gaspermeabilität bei verschiedenen Druckgradienten am Übergang Baugrund-Gebäude (Der Diffusionsparameter wurde hier mit $D = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (schluffiger Sand) angenommen.)

Ist der Baugrund jedoch durch Festgestein mit Klüften oder Rissen geprägt, findet der konvektive Transport nicht über die Feinporen, sondern hauptsächlich in den Klüften oder Rissen statt. Die Strömungsgeschwindigkeit der radonhaltigen Luft in Klüften wird dann von den geometrischen Abmessungen der Klüfte und dem jeweiligen Druckgradienten bestimmt. Dies führt letztlich dazu, dass selbst bei geringen Luftdruckänderungen der Gas-Transport in den Klüften über relativ große Entfernungen von mehr als 100 m stattfinden kann [6] und somit die Gaspermeabilität k_B der Bodenmatrix nicht mehr der prozessbestimmende Parameter ist. Die Radontransportgeschwindigkeit in Rissen oder Klüften in einem Baugrund kann durch spezielle Tracergas-Ausbreitungs-Untersuchungen experimentell bestimmt werden (s. z.B. [6]).

Die konvektiven Strömungsprozesse werden generell durch die am Übergang Baugrund-Gebäude auftretenden Druckdifferenzen verursacht, die ihrerseits auf Temperaturunterschiede zwischen dem Inneren des Hauses auf der einen Seite sowie der Außenluft ΔT_A und der Bodenluft ΔT_B auf der anderen Seite bestehen oder auch durch den Winddruck am Gebäude (Bernoulli-Effekt) zurückzuführen sind. Diese Differenzdrücke sind die entscheidende physikalische Modellgröße und betragen in der Regel nur wenige Pa. Sie können jedoch mit empfindlichen Druckmessgeräten zeitaufgelöst gemessen oder aus gemessenen Temperaturdifferenzen berechnet werden.

2.4 Radoneintritt in ein Gebäude

Der Radoneintritt in ein Gebäude findet an der Grenzfläche des Baugrundes und den bodenberührenden Gebäudeteilen (Fundament, Kellerwände, Bodenplatte) statt. Dabei kann die Radonmigration durch diese Grenzflächen wiederum durch diffusive oder konvektive Transportprozesse bedingt sein. Der Diffusionskoeffizient von Baustoffen, wie Beton, ist in der Regel deutlich geringer als vom Baugrund, so dass die Gebäudehülle in der Regel wie eine Diffusionsbarriere wirkt (Boden: $D_{\text{eff}} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; Beton: $D_{\text{eff}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$).

Auch hier gilt wiederum, dass der konvektive Transport durch Risse und Leitungsdurchführungen oder anderen Öffnungen in der Regel den dominierenden Prozess darstellt. Die Rissgeometrien oder anderweitigen Leckagestellen können jedoch schwer quantifiziert werden. In Anlehnung an die experimentellen Verfahren zur Beurteilung der Gebäudedichtheit in der Bauphysik ist deshalb eine effektive Leckagefläche F_{RLA} (RLA – radon leakage area) in der Gebäudehülle durch einen Drucktest experimentell zielführend. Der konvektive Radonfluss durch die Gebäudehülle kann dabei mit der empirischen Gleichung

$$Q_{\text{Rn}} = C_{\text{B}} \cdot F_{\text{RLA}} \cdot v_0 \left(\frac{\Delta p}{p_0} \right)^n \quad (7)$$

beschrieben werden, wobei C_{B} die Radonkonzentration im Baugrund und v_0 eine Referenzgeschwindigkeit bei einem Referenzdruck von 4 Pa darstellt [13]. Damit wird deutlich, dass der Radoneintritt in ein Gebäude durch einen Unterdruck im Gebäude verursacht und wesentlich durch die Größe (Eintrittsfläche) der Leckagen geprägt wird. Für die experimentelle Bestimmung des konvektiven Radonflusses durch die Gebäudehülle (Risse, Durchführungen) gibt es noch keine anerkannten Untersuchungsverfahren. Das sogenannte Radon-Sniffing liefert nur qualitative Ergebnisse. Hier kann die Tracergas-Technologie in Verbindung mit Radon- und Differenzdruckmessungen einen wesentlichen Beitrag leisten.

2.5 Beeinflussung der Radonkonzentration in einem Gebäude durch Luftaustausch mit der Außenluft

In der Regel ist davon auszugehen, dass die Radon-Konzentration in der freien Atmosphäre deutlich geringer als im Gebäude selbst ist. Ausnahmen können in der unmittelbaren Umgebung bergbaulicher Hinterlassenschaften (Halden, Gruben) auftreten. Der Luftaustausch der Innenraumluft mit der Außenluft kann durch die Luftwechselrate Λ quantifiziert werden.

Wird vereinfachend das Gebäude oder ein bestimmter Raum in einem Gebäude als eine Box mit dem Volumen V angenommen, die Rn-Eintrittsrate in den Raum sei q_{R} und Λ stellt die Luftaustauschrate mit der Außenluft dar, so ergibt sich die zeitliche Änderung der Radonkonzentration aus folgender Differentialgleichung

$$\frac{dC_{\text{R}}(t)}{dt} = q_{\text{R}} + \Lambda C_{\text{a}} - C_{\text{R}}(t)\Lambda - \lambda C_{\text{R}}(t) , \quad (8)$$

deren analytische Lösung angegeben werden kann.

Die Luftwechselrate Λ kann entweder aus der gemessenen Zeitabhängigkeit der Radonkonzentration im Raum nach einem Lüften oder durch Tracergas-Messungen experimentell relativ einfach ermittelt werden [14]. In Abbildung 3 ist beispielhaft die gemessene Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration nach einer Impulsaufgabe in einem Raum dargestellt, aus der mit einem Fit die Luftwechselrate bestimmt werden kann.

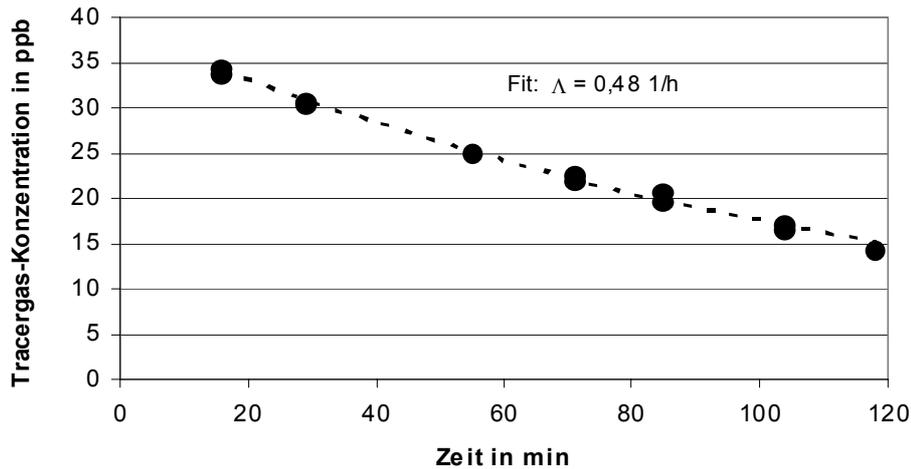


Abbildung 3: Zeitliche Änderung der gemessenen Tracergaskonzentration in einem Raum zur Bestimmung der Luftwechselrate

3 Konzeptionelles Modell zur Prognose von Radonkonzentrationen in Gebäuden

Basierend auf den oben dargestellten Prozessen kann unter vereinfachenden Annahmen ein konzeptionelles Prognosemodell erstellt werden, um die Radonkonzentration im Gebäude zu ermitteln und um die wesentlichen Prozessgrößen zu identifizieren. Die Anwendung eines solchen konzeptionellen Modells setzt die experimentelle Bestimmung einer Reihe von prozessbestimmenden Parametern für den Radontransport im Baugrund und der Gebäudehülle voraus.

Dieser Weg wurde von anderen Autoren in Form verschiedener einfacher Modelle besprochen. Im Zusammenhang mit der Beschreibung des Transportes organischer Schadstoffe aus dem Baugrund in ein Haus wurde ein entsprechendes Modell entwickelt [15], das durch die EPA in den USA eine entsprechende Verbreitung fand. Auf Grundlage dieses Modells kann bei bekannter Radonkonzentration in der Bodenluft C_B die Radonkonzentration innerhalb des Gebäudes C_{Geb} nach

$$C_{Geb} = \alpha \cdot C_B \quad (9)$$

berechnet werden, wobei der Transferkoeffizient α sowohl die diffusiven Transportmechanismen als auch die dominierenden konvektiven Prozesse für den Transport durch die Gebäudehülle berücksichtigt. In der Regel ist der Transferkoeffizient α eine Funktion der Zeit, die hauptsächlich durch die Zeitabhängigkeit der die konvektiven Radontransportprozesse triggernden konvektiven Prozesse bestimmt ist. Für sehr vereinfachte quasistatischen Bedingungen hängt der Transferkoeffizient α nur noch von der Ventilationsrate des Gebäudes als dynamische Größe ab, während alle anderen Einflussfaktoren zeitlich als annähernd konstant angesehen werden können:

$$\alpha = \frac{\left[\frac{D_{eff} A_b}{Q_V L_T} \cdot \exp\left(\frac{Q_B L_{Riss}}{D_{Riss} A_{Riss}}\right) \right]}{\left[\exp\left(\frac{Q_B L_{Riss}}{D_{Riss} A_{Riss}}\right) + \frac{D_{eff} A_b}{Q_V L_T} + \frac{D_{eff} A_b}{Q_B L_T} \cdot \left[\exp\left(\frac{Q_B L_{Riss}}{D_{Riss} A_{Riss}}\right) - 1 \right] \right]} \quad (10)$$

wobei

- D_{eff} der effektive Diffusionskoeffizient des Bodens,
- D_{Riss} der effektive Diffusionskoeffizient durch Risse in der Gebäudehülle,
- A_b die bodenberührende Fläche des Gebäudes in,
- Q_V die Ventilationsrate des Gebäudes
- L_{Riss} die Dicke des Gebäudefundamentes (Bodenplatte)
- L_T die Tiefe (Abstand) der Radonquelle unter dem Gebäude,
- Q_B die Eintrittsrate der Bodenluft in das Gebäude,
- A_{Riss} die totale effektive Rissfläche in der Gebäudehülle sind.

Gl. (10) veranschaulicht, dass die in einem Gebäude sich einstellende Radon-Konzentration sowohl von der Bodenbeschaffenheit als auch der Größe der Leckagen abhängig ist.

Im nichtstationären Fall wird der Radontransport aus dem Baugrund in das Gebäude und der Austausch der Gebäudeinnenluft mit der Außenluft durch ein System von gekoppelten Differentialgleichungen beschrieben (s. z.B. [9]), so dass der Transferkoeffizient α eine explizite Funktion der Zeit ist, die die tageszeitlichen Radonkonzentrationsänderungen (Tagesgänge) und saisonalen Änderungen reflektieren. Deshalb kann eine einfache Gegenüberstellung von Bodenluft- und Raumluftdaten [16] das Radonrisiko eines Baugrundes nicht ausreichend charakterisieren.

Es ist somit festzustellen, dass die Kombination von geeigneten Modellannahmen und der experimentellen Bestimmung der wesentlichen Prozessparameter das Verständnis für relativ hohe Radonkonzentrationen erhöhen wird und darauf aufbauend effektive Sanierungslösungen entwickelt werden können. Dabei muss zukünftig den konvektiven Transportprozessen und ihrer Beschreibung durch geeignete Modelle verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

4 Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum radonsicheren Bauen und zu effizienteren Methoden der Sanierung von Häusern zur Reduzierung von Radonbelastungen ist die Quantifizierung der wesentlichen Prozesse, die den Radontransport beeinflussen, von grundlegender Bedeutung. Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigten, dass der konvektive Radontransport die dominierende Ursache für relativ hohe Radonkonzentrationen in Gebäuden darstellt. Darauf aufbauend wird eine komplexe Vorgehensweise zur fundierten Situationsaufklärung empfohlen, wobei moderne Messmethoden, wie Gamma-Spektrometrie, zeitaufgelöste Radon- und Radonzerfallsproduktmessung in Kombination mit Temperatur- und Differenzdruckmessungen, die Tracergas-Technologie sowie Verfahren zur Bestimmung der Gaspermeabilität die wesentlichen Daten zur Prozesscharakterisierung liefern. Die bestimmenden Prozesse sind für entsprechende Prognosen auf der Grundlage einer komplexeren Datenermittlung mit einfachen Modellen abzubilden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Darby, S., D. Hill, A. Auvinen, et al: Radon in homes and risk of lung cancer, Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *BMJ* 330: 223-227; 2005.
- [2] Strahlenschutzkommission: Auswertung der vorliegenden Gesundheitsstudien zum Radon / Stellungnahme der Strahlenschutzkommission zur Wirkung des Radons. - verabschiedet in der 192. Sitzung am 24.06.2004.
- [3] Strahlenschutzkommission: Lungenrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen verabschiedet in der 199. Sitzung am 21./22. 04. 2005.
- [4] Radon-Handbuch Deutschland, Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesamt für Strahlenschutz, Bonn 2001.
- [5] Schulz H., E. Hermann, W. Löbner, J. Höpner, Bewertung des Radonrisikos eines Baugrundes, Radonstatusgespräch 2004, Berlin.
- [6] Buchröder, H., C. Dushe, E. Ettenhuber, M. Kümmel, V. Schmidt, W. Löbner, J. Regner, L. Funke, A. Schellenberger H. Schulz, Radonfreisetzung aus Halden, Radonstatusgespräch 2003, Berlin.
- [7] Lehmann R.: Strahlenbelastung durch natürliche Radionuklide in Baumaterialien, fossilen Brennstoffen und Düngemitteln. In: A. Siehl: Umweltradioaktivität. Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1996.
- [8] Gellermann R., H. Schulz, "Erhöhte natürliche Radioaktivität in Baugrund und Baustoffen - neue Anforderungen an die Ingenieurplanung Planen und Bauen", Beratende Ingenieure, September 2004, Springer-VDI-Verlag, 26 – 31.
- [9] Nazaroff, W.W. and A.V. Nero (eds.). Radon and its decay products in indoor air. New York: John Wiley & Sons Inc., 1988 .
- [10] Rogers, V. C., K.K. Nielson, Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials, *Health Phys.* 60, 807 - 815, (1991)
- [11] Rogers, V. C., K.K. Nielson, Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials, *Health Phys.* 60, 807 - 815, (1991)
- [12] Tanner, A. B., The Role of Diffusion in Radon Entry into Houses, Proc. of the International Symposium on Radon and Radon Reduction, Atlanta, Georgia 19 - 23 February 1990
- [13] Löbner, W., Ch. Schramm, J. Regner, u.a.: Bericht über ergänzende Messungen zur Radonsituation in Schneeberg, WISMUT GmbH, intern. Bericht, 2004.
- [14] Sherman, M., Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry, Proc. Of ASHRAE-DOE-BTECC Conf. on Building Thermal Envelopes, Atlanta, GA: ASHRAE, 1992, LBL-31305.
- [15] Johnson, P.C., R.A. Ettinger, Heuristic Model for Predicting the Intrusion Rate of Contaminant Vapors into Buildings, *Environ. Sci. and Techn.* 25, 1445-1452 (1991).
- [16] Kemski, J., R. Klingel, A. Siehl "Zusammenfassende Betrachtung von Bodenluft- und Raumluftdaten aus den Jahren 1989 - 2003", Radonstatusgespräch 2004, 14./15. Oktober 2004, Berlin.



Die Strahlenexposition der Bevölkerung beim Aufenthalt in Gebäuden Messtechnische Erfassung der Radonkonzentration

Dr. rer. nat. Andreas Guhr

Einführung

Die bedeutendste Komponente der natürlichen Strahlenexposition ist die Belastung der Bevölkerung infolge Radon beim Aufenthalt in Gebäuden. Diese Exposition wird nach dem Zigarettenrauchen als wesentlichster Faktor für die Entstehung von Lungenkrebs angesehen. Von den 40.000 Neuerkrankungen an Lungenkrebs pro Jahr sind etwa 3.000 auf Radon zurückzuführen. Zugrunde gelegt wurde diesen Schätzungen die für die Bundesrepublik Deutschland ermittelte Normalverteilung der Radonkonzentration in Wohnungen mit einem Medianwert von 39 Bq/m^3 .

Die Werte der Radonkonzentration in Wohnungen werden im Wesentlichen durch das geogene Radonpotential des Bodens sowie die Bauart der Häuser bestimmt. Eine geringere Belüftung der Wohnung und eine durch technische Maßnahmen bedingte niedrigere Luftwechselzahl führen zu einem deutlichen Anstieg der Radonkonzentration und damit steigenden Expositionen der Bewohner.

Die Situation

Im Ergebnis von Sanierungs- bzw. Modernisierungsmaßnahmen an bestehenden Objekten, in der Regel realisiert mit dem Ziel der Energieeinsparung, können deutlich höhere Werte der Radonkonzentration resultieren als vor Baubeginn, wenn das Radonproblem bei der Projektierung dieser Maßnahmen nicht beachtet wird. Eine Bauwerksabdichtung gemäß den Vorgaben der Energieeinsparverordnung EnEV 2002 und die damit verbundene zum Teil deutliche Senkung des Luftaustausches kann neben der Bildung von Schimmelpilzen und dem Auftreten von Bauschäden auch zu einem Anstieg der Radonkonzentration bis in Bereiche führen, wo eine Gesundheitsgefährdung besteht. Betroffen sind vor allem Bewohner von Häusern, die auf Baugrund mit geologisch bedingt erhöhter Radonkonzentration errichtet wurden.

Ein an der Gesundheitsvorsorge orientiertes Schutzkonzept zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung wird zukünftig auch eine grundsätzliche Senkung der Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen zum Ziel haben müssen. Als Aufenthaltsräume sind Räume zu betrachten, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind, also auch vermietete Wohn- und Arbeitsräume, Kindergärten und Schulen.

Um sicher unterhalb einer Radonkonzentration zu bleiben, oberhalb der Gesundheitsschäden nachweisbar sind wird von den zuständigen Behörden darauf orientiert, in Aufenthaltsräumen den Wert von 100 Bq/m^3 als Zielwert für die maximal zulässige Radonkonzentration anzusetzen. Diesbezügliche Regelungen sind vorgesehen. In diesem Zusammenhang ist es nicht nur sinnvoll sondern auch notwendig auf Messverfahren zurückzugreifen, die für den jeweiligen Messzweck auch geeignet sind. Zudem muss besonderer Wert auf die Messgenauigkeit, d.h. eine gültige Kalibrierung der Messgeräte durch eine akkreditierte Kalibrierstelle, gelegt werden.

Messverfahren

Die Radonkonzentration in Gebäuden unterliegt in Abhängigkeit von der Art der Nutzung des Gebäudes sowie den Gewohnheiten der Bewohner Schwankungen, die bis zu drei Größenordnungen betragen können. Im Folgenden sind typische Werte der Radonkonzentration, die für die Bundesrepublik Deutschland repräsentativ sind, aufgeführt.

- Mittelwert in der Freiluft 15 Bq/m³
- Mittelwert in der Raumluft 50 Bq/m³
- Mittelwert im Trinkwasser 5.000 Bq/m³
- Bereich in 1m Tiefe im Boden 5.000 - 500.000 Bq/m³

Beispiel: 50 Bq/m³: In einem Kubikmeter Luft zerfallen pro Sekunde 50 Radonatome.

Nachfolgend wird auf Kurzzeitmessungen, kontinuierliche Messungen und langzeitintegrierende Messungen unter dem Gesichtspunkt eingegangen, ob Übersichtsmessungen für eine erste Beurteilung ausreichend sind oder ob genauere Messungen, beispielsweise Bewertungsmessungen, für eine Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind. Die nachfolgende Tabelle zeigt die gängigsten Messverfahren sowie deren Einschätzung hinsichtlich der Eignung für bestimmte Aufgabenstellungen /2/.

Tabelle 1: Überblick über die Eignung von Messverfahren

Messverfahren bzw. –gerät	Übersichtsmessung	Bewertungsmessung
Aktivkohle-Röhrchen	Geeignet	Nicht geeignet
Aktivkohle-Dosen	Geeignet	Nicht geeignet
Kernspur-Verfahren	Geeignet	Geeignet
Elektret-Verfahren	Bedingt geeignet	Geeignet
Aktive Radon-Messgeräte	Geeignet	Geeignet, aber aufwendig
Rn-ZP-Messgeräte	Geeignet	Geeignet, aber aufwendig

Bei der Anwendung der Messgeräte in Gebäuden müssen einige grundlegende Gesichtspunkte beachtet werden:

- Auswahl von zwei im Untergeschoss liegenden Aufenthaltsräumen und, falls vorhanden, ein Raum im Kellergeschoss;
- Aufstellung nach Möglichkeit in der Raummitte in ca. 1 bis 2 m Höhe über dem Fußboden;
- Mindestabstand von 30 cm von Wänden, Decke und Fußboden;
- Messgeräte dürfen nicht in Schränke gestellt werden.

Übersichtsmessungen

Eine Übersichtsmessung (Screening-Messung) der Radonkonzentration sollte in einem der Aufenthaltsräume des Untergeschosses eines Hauses erfolgen. Dabei sollten nach Möglichkeit Messzeiten von mehr als einer Woche, besser ein bis zwei Monate, gewählt werden. Bei Messzeiten bis zu drei Tagen sollten bereits einen Tag vor Beginn und auch während der Messung Fenster und Türen möglichst geschlossen bleiben.

Für Entscheidungsfindungen, beispielsweise im Zusammenhang mit dem Verkauf eines Hauses/Wohnung, sind Übersichtsmessungen mit Messzeiten von wenigen Tagen nicht geeignet. Ist jedoch das Messergebnis der Radonkonzentration aus einer Übersichtsmessung kleiner als ein Viertel der Entscheidungsschwelle, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Entscheidungsschwelle nicht überschritten wird /2/.

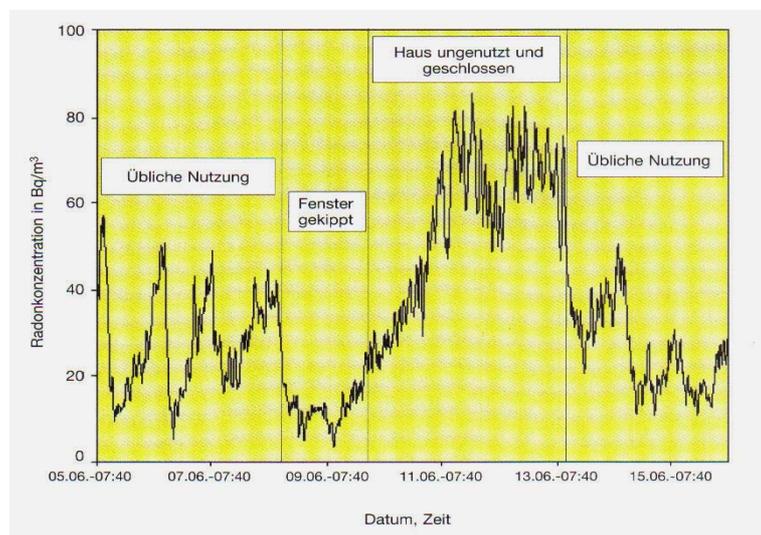
Bewertungsmessungen

Zur Bewertung einer Immobilie hinsichtlich der Radonexposition der Bewohner muss der langzeitige Mittelwert der Radonkonzentration bestimmt werden. Zu diesem Zweck sind Messungen über zwölf aufeinanderfolgende Monate durchzuführen. Ersatzweise können Messungen über einen Zeitraum von drei Monaten, vorzugsweise während der Übergangsperioden Frühjahr und Herbst, erfolgen /3/. Die Messungen selbst sollten in drei getrennten Räumen wie beispielsweise Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer durchgeführt werden.

Kontinuierliche Messungen

Kontinuierlich messende Geräte liefern den zeitlichen Verlauf der Radonkonzentration. Das zeitliche Auflösungsvermögen der einzelnen Gerätetypen ist unterschiedlich und variiert in der Regel zwischen wenigen Minuten und einem Tag. Die gespeicherten Messdaten können nach Beendigung der Messung ausgelesen werden. Die nachfolgende Darstellung zeigt den typischen Verlauf der Radonkonzentration in einem genutzten Gebäude, aufgenommen mit einem kontinuierlich messenden Gerät.

Hinweise zur Durchführung von Radonmessungen in Häusern



Quelle: BfS

Abbildung 1: Kontinuierliche Messung der Radonkonzentration in einem bewohnten Gebäude

Bei Abwesenheit der Bewohner von mehr als einer Woche, beispielsweise bei Abwesenheit infolge Urlaub, sollten keine Messungen durchgeführt werden. An Tagen mit extremen Wetterverhältnissen, beispielsweise bei starkem Wind, sollten keine Kurzzeitmessungen erfolgen.

Messtechnik

Aufschluss darüber, ob erhöhte Werte der Radonkonzentration in einem Aufenthaltsraum bzw. einem Gebäude vorliegen, kann nur über Radonmessungen erfolgen. Nachfolgend sind einige Messgeräte, die für die in der Tabelle 1 aufgeführten Messverfahren typisch sind, beispielhaft abgebildet (Abbildung 2 und 3). Bei den in der Abbildung 2 dargestellten Messsystemen handelt es sich um so genannte passive Radon-Diffusionskammern auf der Grundlage von Kernspur-Detektoren. Diese Messgeräte eignen sich sowohl für Übersichts- als auch Bewertungsmessungen mit typischen Messzeiten bis zu einem Jahr.

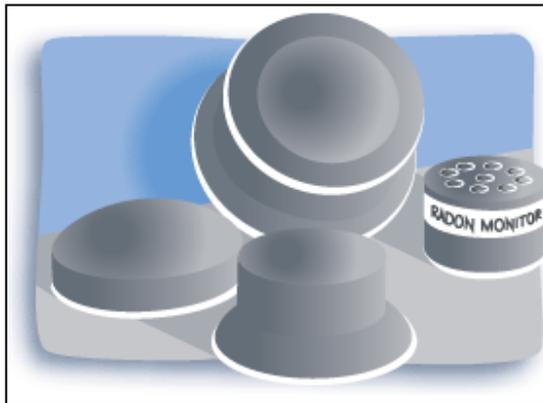


Abbildung 2: Passive Radon-Diffusionskammern auf der Basis von Kernspur-Detektoren (Quelle: BAG)

In der Abbildung 3 sind kontinuierlich messende Geräte elektronischer Bauart dargestellt. Diese Messgeräte können den Verlauf der Radonkonzentration zeitaufgelöst erfassen. Allerdings eignen sich diese Geräte auf Grund des vergleichsweise hohen arbeitsorganisatorischen und finanziellen Aufwandes gegenüber den in der Abbildung 2 dargestellten Radon-Diffusionskammern nur bedingt für Bewertungsmessungen.

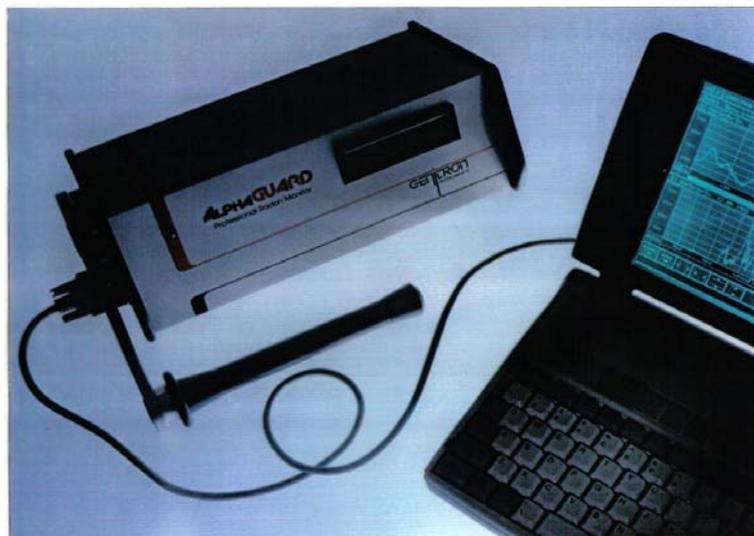


Abbildung 3: Beispiel für kontinuierlich messendes Gerät mit Datenspeicher und Ausleseeinheit

Werden mit langzeitintegrierenden Radon-Diffusionskammern erhöhte Radonkonzentrationen festgestellt, ist zur Auffindung der Eintrittspfade von Radon in das betreffende Gebäude der Einsatz kontinuierlich messender Geräte mit zeitaufgelöster Darstellung des Verlaufes der Radonkonzentration unumgänglich.

Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass kein Haus dem anderen gleicht. Das betrifft sowohl die Baustanz als auch den Untergrund. Das Vorhandensein radonsperrender Schichten unter dem Haus, wie beispielsweise Lehm, kann sich hemmend auf den Eintrag von Radon in Gebäude auswirken.

Jedes Haus muss für sich betrachtet werden, d.h. aus dem Messwert der Radonkonzentration in einem Haus können keinerlei Rückschlüsse auf die zu erwartenden Radonmesswerte in den Nachbarhäusern gezogen werden. Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 4) verdeutlicht diesen Sachverhalt an einem Beispiel. In einem Areal mit den Abmessungen 400 x 400 Meter wurde die Radonkonzentration mittels Langzeitmessungen in 62 Gebäuden bestimmt. Die einzelnen Mittelwerte unterscheiden sich teilweise signifikant.



Abbildung 4: Verteilung der Radon-Messwerte in 62 Gebäuden auf einer Fläche von 0,16 km²

Wesentlichen Einfluss auf die zu erwartende Radonkonzentration in einem Gebäude hat der geologische Untergrund, auf dem ein Gebäude errichtet werden soll. Das geogen bedingt vorhandene Radonpotenzial unter einem Gebäude kann durch eine Untersuchung des Baugrundes ermittelt werden. In diesem Zusammenhang ist es vorteilhaft, vor der Errichtung von Neubauten die Radonkonzentration in einem Meter Tiefe im Erdreich zu ermitteln.

Qualitätssicherung und Messsicherheit

Der statistische Charakter des radioaktiven Zerfalls äußert sich bei Wiederholungsmessungen in der schwankenden Statistik der einzelnen Messwerte. Die Zahlenwerte der Messgröße Aktivitätskonzentration schwanken von einer Messung zur nächsten. Je kleiner die Messgröße ist um so größer sind die Schwankungen der Messwerte untereinander. Aus diesem Grund sollten mit Radon-Diffusionskammern auf der Basis von Kernspur-Detektoren keine Messungen mit Messzeiten unter einem Monat durchgeführt werden wenn zu erwarten ist, dass die Radonkonzentration im Gebäude unter 100 Bq/m^3 liegt.

Ähnliches gilt für kontinuierlich messende Geräte. Hier sollte bei vergleichsweise niedrigen Radonkonzentrationen über einen Zeitraum von mindestens zwölf Stunden gemessen werden. Bei kontinuierlich messenden Geräten ist darüber hinaus zu beachten, dass nach dem Beginn einer Messung, also nach dem Einschalten dieser Geräte die ersten zwei oder gar drei angezeigten Messwerte nicht immer repräsentativ sind.

Ein sehr wichtiger Aspekt bei der Bewertung von Messergebnissen ist die Qualitätssicherung bei allen zum Einsatz gelangenden Radon-Messgeräten. Für die Ermittlung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach § 95 Anlage XI Teil A der novellierten Strahlenschutzverordnung, d.h. für Beschäftigte in Anlagen zur Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung, Radon-Heilbädern und Bergwerken, gilt seit dem 15.12. 2003 die „Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition“ /4/. Demnach sind kontinuierlich messende Geräte mit Direktanzeige für den Messzweck geeignet, wenn sie über eine Kalibrierung einer akkreditierten Kalibrierstelle (PTB Braunschweig oder BfS Berlin) verfügen und diese nicht älter als zwei Jahre ist.

Radon-Diffusionskammern sind für den Messzweck geeignet, wenn die Messstelle mit den von ihr ausgegebenen Messgerätetypen an den jährlich stattfindenden Vergleichsprüfungen des BfS Berlin teilnimmt und die Eignung durch das BfS festgestellt wird.

Die Radon-Sanierung von Gebäuden ist in der Regel mit vergleichsweise hohem bautechnischen Aufwand und demzufolge hohen Kosten verbunden. In diesem Zusammenhang ist es ratsam, auch für Messungen außerhalb des Geltungsbereiches des § 95 StrlSchV die o.g. Maßstäbe anzusetzen, um mögliche rechtliche Konsequenzen infolge nicht ordnungsgemäß kalibrierter Messgeräte von Vornherein auszuschließen.

Die Entscheidungsfindung, ob ein Gebäude zum Schutz der Bewohner bzw. der Nutzer vor Gesundheitsgefahren infolge einer erhöhten Radonkonzentration saniert werden muss, sollte demzufolge nur auf der Grundlage geeigneter Messgeräte mit gültiger Kalibrierung erfolgen.

Zusammenfassung

Die Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Messsystems zur Bestimmung der Radonkonzentration umfassen nicht nur messtechnische Anforderungen an die einzelnen Verfahren sondern auch ökonomische Gesichtspunkte. In diesem Zusammenhang spielt die Messgenauigkeit eine entscheidende Rolle. Auch die Dauer einer Messung, d.h. die Entscheidungsfindung ob Kurzzeitmessung oder Langzeitmessung, ist ein wesentliches Kriterium für die Ermittlung repräsentativer Ergebnisse der Radonkonzentration. Darüber hinaus sollten Radonmessungen nur mit Messgeräten erfolgen, die über eine gültige Kalibrierung verfügen.

Literaturverzeichnis

- /1/ Ettenhuber, E. et al.; Begrenzung der Strahlenexposition durch Radon in Aufenthaltsräumen; Strahlenschutzpraxis; Heft 1/2005; S. 52-58
- /2/ Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten; Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission; Band 47 (2002)
- /3/ Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung der Strahlenexposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Gebäuden; RS II 2 – 17 027/2 (1994)
- /4/ Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung; RS II 3 – 15506/9 (2003)

Konzept zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte beim Aufenthalt in Gebäuden

Dr. rer. nat. Eckard Ettenhuber
Dipl.-Geophys. Rainer Lehmann

1. Gesundheitliche Effekte durch Radon

Radon und seine Zerfallsprodukte werden vom Menschen mit der Atemluft aufgenommen. Während das Edelgas Radon zum größten Teil wieder ausgeatmet wird, werden seine Zerfallsprodukte (dabei handelt es sich um die radioaktiven Schwermetalle Polonium-218, Wismut-214, Blei-214 und Polonium-214) im Atemtrakt angelagert.

Das beim Aufenthalt im Freien und in Gebäuden eingeatmete Radon und seine Zerfallsprodukte bewirken eine Exposition der Atemwege, die in Deutschland zu einer mittleren effektiven Dosis von 1,1 Millisievert pro Jahr (mSv/a) führt [1]. Andere Organe werden durch Radon und seine Zerfallsprodukte nach derzeitiger Kenntnis weitaus weniger belastet.

In einer Reihe internationaler Studien wurde der Zusammenhang zwischen einer langjährigen Exposition durch Radon in Wohnungen und dem Auftreten von Lungenkrebs untersucht. Auf dieser Grundlage kommt die deutsche Strahlenschutzkommission in Ihrer 199. Sitzung im April 2005 [2] zu folgender Bewertung:

- Zusammenfassende Auswertungen dieser Studien in Europa und Nordamerika zeigen einen klaren Anstieg des Lungenkrebsrisikos mit steigender Radonkonzentration,
- dieser Zusammenhang ist auch für lebenslange Nichtraucher nachweisbar,
- eine signifikante Risikoerhöhung wurde ab einem Konzentrationsintervall von 100 –199 Bq/m³ festgestellt,
- die Expositions-Wirkungs-Beziehung ist linear ohne Schwellenwert und beträgt etwa 10 % pro 100 Bq/m³ Radonkonzentration.

Achtung:

Die Unsicherheit bei der Risikoabschätzung ist geringer als bei anderen krebserregenden Stoffen.

2. Bestehende Regelungen der Strahlenexposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Gebäuden

Internationale Regelungen s. Anlage.

In Deutschland ist die Strahlenexposition durch Radon bei Arbeiten in der Strahlenschutzverordnung Teil 3 geregelt. In der Anlage XI Teil A [3] werden folgende Arbeitsfelder mit erheblich erhöhten Radon-222-Expositionen genannt:

- Untertägige Bergwerke, Schächte und Höhlen, einschließlich Besucherbergwerke,
- Radon-Heilbäder und -Heilstollen,
- Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung.

3. Optimale Vorgehensweise zur Begrenzung der Radonexposition in Aufenthaltsräumen

Die Stellungnahme der Strahlenschutzkommission fordert dazu auf, im Sinne der Konsistenz von Risikoeinstufungen Regelungen zur Begrenzung der Radonexposition in Wohnungen vorzubereiten.

Bei der Begrenzung der Radonexposition in Gebäuden sind die oben genannten generellen Randbedingungen zu beachten. Darüber hinaus muss in Betracht gezogen werden:

- Die Häufigkeit der Radonkonzentration in Wohnräumen ist in Deutschland annähernd logarithmisch normalverteilt.
- Die Radonkonzentration im Freien liegt überwiegend im Bereich bis 30 Bq/m³.
- Die Radonfreisetzung aus mineralischen Baumaterialien, die den Hauptanteil der Wohnbausubstanz bilden, liefert in den meisten Fällen einen Beitrag bis zu 70 Bq/m³ zur Radonkonzentration in Wohnräumen. Der Medianwert dieses Beitrages beträgt 30 Bq/m³.
- Überschreitungen der Radonkonzentration von 100 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen sind in der Regel auf Radon aus dem Baugrund zurück zu führen.

Unter Berücksichtigung dieser Prämissen ist folgende Vorgehensweise abzuleiten:

- Die Strahlenexposition durch Radon soll so weit wie möglich gesenkt werden.
- Die insgesamt wirksamste Reduzierung der Strahlenexposition und damit von Gesundheitsschäden durch Radon wird für die Gesamtbevölkerung erreicht, wenn der bundesweite Mittelwert so weit wie möglich gesenkt wird. In diesem Sinne wird in den USA als Ziel gesetzlich formuliert [4], für die Radonkonzentration in Gebäuden langfristig das der üblichen Umgebungsluft zuordenbare Konzentrationsniveau zu erreichen. Diese Zielstellung ist jedoch in Deutschland auf Grund des aus traditionell verwendeten Baumaterialien freigesetzten Radons in den meisten Fällen praktisch nicht realisierbar.

Daraus folgt:

➔ **Als praktikable und den Umständen angemessene Zielstellung sollte gelten, Radonkonzentrationen von über 100 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen durch Anwendung optimaler Maßnahmen zu vermeiden.**

Achtung: Dieses Ziel ist als das Ergebnis einer Optimierung anzustreben und ist nicht als Grenzwert zu interpretieren.

Das Ziel sollte erreicht werden mit:

- der Standortsituation angemessenen Maßnahmen beim Neubau,
- Messung der Radonkonzentration in Gebäuden,
- der Höhe der gemessenen Radonkonzentration angemessenen Sanierungsmaßnahmen.

Bei der Beurteilung der Sanierungsnotwendigkeit sollte die Aufenthaltszeit in den betroffenen Räumen berücksichtigt werden. Die oben genannten Gesundheitsrisiken basieren auf Studien in Wohnräumen, wo von einem durchschnittlichen täglichen Aufenthalts-Zeitanteil von über 50 % ausgegangen wird.

Ausgehend von Messungen in über 50 000 Gebäuden und Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft können auf Grund ihrer Geologie heute einerseits Gebiete mit natürlich erhöhtem Radongehalt im Boden identifiziert werden und andererseits auch Gebiete beschrieben werden, wo mit hoher Wahrscheinlichkeit der Baugrund als Quelle für Radonkonzentrationen über 100 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen nicht in Frage kommt. Vielerorts sind aber noch nicht genügend Untersuchungen durchgeführt worden, um die Radonsituation hinreichend sicher bewerten zu können.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Messungen sowie der Gebäudeverteilung in Deutschland kann nach grober Abschätzung davon ausgegangen werden, dass in mindestens 10 bis 12 % der bestehenden Ein- und Zweifamilienhäuser Radonkonzentrationen über 100 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen vorkommen.

Literatur

- [1] Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlung und Strahlenschutz, 3. Auflage, 2004
- [2] Strahlenschutzkommission: Lungenkrebsrisiko durch Radonexposition in Wohnungen, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 199. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 21./22. April 2005
- [3] Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001, BGBl. I S. 1714, BGBl. III 751-1-8)
- [4] US Public Law 100-551, USC Sec 2661, October 28th 1988

Anlage

Radon in Aufenthaltsräumen (Wohnungen, Schulen etc.)

bestehende Gebäude					
EU-Staaten					
Land	Empfehlung in Bq/m ³	Grenzwert in Bq/m ³	Gültigkeit	Bemerkung	Quelle
Belgien	400	-	Empfehlung für Wohnungen		Akerblom
Dänemark	200/400	-	Empfehlung für Wohnungen	200 Bq/m ³ einfache Maßnahmen, 400 Bq/m ³ kostenintensive Maßnahmen	Akerblom
Deutschland	nicht >100	-		Unter Optimierungsgrundsätzen in Aufenthaltsräumen anzustreben	BfS
Estland	400	-			Akerblom
Finnland	400	400	Grenzwert gilt für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude	Grenzwert für öffentliche Gebäude im Radiation Act, Empfehlung für Wohnungen vom Ministerium für Soziales und Gesundheit	Arvela /Mäkeläinen STUK
Frankreich	-	400/1000	Grenzwert gilt für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude	gilt in 31 Departments; 400/1000 Bq/m ³ abgestufte Maßnahmen	Collignan 2004
Griechenland	400		Wohnungen		ERRICCA 2
Großbritannien	200	400	Grenzwert für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude, Richtwert für Wohnungen		Miles, NRPB
Irland	200	-	Wohnungen		ERRICCA 2
Italien	-	500	Action Level für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude, Arbeitsplätze	Berücksichtigung der Nutzungszeit Ziel eff. Dosis ≤ 3mSv/a (nicht in Schulen und Kindergärten)	Risica
Lettland	300	600			Akerblom
Litauen	-	400			Akerblom
Luxemburg	150	-			Akerblom
Niederlande	-	-			ERRICCA 2
Österreich	400	-	Empfehlung für Wohnungen		Akerblom
Polen	-	-	Grenzwert für Wohnungen		Akerblom
Portugal	-	-		Euratom 29/96 noch nicht umgesetzt	Akerblom
Schweden	-	200	Bis 2020 soll der Umweltstandard von 200 Bq/m ³ in allen Wohnungen eingehalten werden	Die Grenze für Förderung von Radonsanierungen wurde von 400 Bq/m ³ auf 200 Bq/m ³ gesenkt	ERRICCA 2
Slowakei	-	200 EEC			Akerblom
Slowenien	400		Empfehlung für Wohnungen		ERRICCA 2
Spanien	-	-			ERRICCA 2
Tschechien	400	4000			Hulka 2004
Ungarn	600	-	geplant		Akerblom

europäische Nicht-EU-Staaten					
Land	Empfehlung in Bq/m ³	Grenzwert in Bq/m ³	Gültigkeit	Bemerkung	Quelle
Jugoslawien	200	400			Akerblom
Norwegen	200/400		Einfache-/ Kostenintensive Maßnahmen		Akerblom
Rußland	-	200/400	Einfache-/ Kostenintensive Maßnahmen	Umzug der Bewohner (bei Einverständnis), Nutzungsänderung oder Abriss des Gebäudes	Akerblom
Schweiz	400	1000			Akerblom
Weißrußland	200	400			Akerblom
außereuropäische Staaten					
Land	Empfehlung in Bq/m ³	Grenzwert in Bq/m ³	Gültigkeit	Bemerkung	Quelle
Australien	200	-			Akerblom
Israel	200	200			Akerblom
Kanada	800	-			Akerblom
Syrien	200	-			Akerblom
USA	150	-			Akerblom

Neue Gebäude					
EU-Staaten					
Land	Empfehlung in Bq/m ³	Grenzwert in Bq/m ³	Gültigkeit	Bemerkung	Quelle
Belgien	-	-			Akerblom
Dänemark	200/400	-		200 Bq/m ³ einfache Maßnahmen, 400 Bq/m ³ kostenintensive Maßnahmen	Akerblom
Deutschland	nicht >100	-		Unter Optimierungsgrundsätzen in Aufenthaltsräumen anzustreben	BfS
Estland	200	-			Akerblom
Finnland	-	200	Planungsniveau gemäß finnischer Bauordnung		Arvela, STUK (2005)
Frankreich	-	400/1000	Grenzwert gilt für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude	gilt in 31 Departments; 400/1000 Bq/m ³ abgestufte Maßnahmen	Collignan 2004
Griechenland	200	-			Akerblom
Großbritan- nien	200	400	Grenzwert für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude, Empfehlung für Wohnungen		Miles, NRPB; (Akerblom)
Irland	200	-			Akerblom
Italien	-	500	Action Level für Schulen, Kindergärten, öffentliche Gebäude, Arbeitsplätze	Berücksichtigung der Nutzungszeit Ziel, eff. Dosis ≤ 3mSv/a (nicht in Schulen und Kindergärten)	Risica
Lettland		300			Akerblom
Litauen		200			Akerblom
Luxemburg	150	-			Akerblom
Niederlande	-	-			Akerblom
Österreich	200	-			Akerblom
Polen		200			Schriftl. Inform.
Portugal	-	-			Akerblom
Schweden	-	200			Mjones (Mail vom 14.4.2003)
Slowakei	100 EEC				Akerblom
Slowenien	200	-			
Spanien	200	-	Empfehlung für Wohnungen		ERRICCA 2
Tschechien	100 EEC	-			Akerblom
Ungarn	600	-	geplant		Akerblom
europäische Nicht-EU-Staaten					
Land	Empfehlung in Bq/m ³	Grenzwert in Bq/m ³	Gültigkeit	Bemerkung	Quelle
Jugoslawien	-	200			Akerblom
Norwegen	-	200			Akerblom
Rußland	-	200			Akerblom
Schweiz	400	1000			Akerblom
Weißrußland		200			Akerblom

außereuropäische Staaten					
Land	Empfehlung in Bq/m ³	Grenzwert in Bq/m ³	Gültigkeit	Bemerkung	Quelle
Australien	200	-			Akerblom
Israel	-	200			Akerblom
Kanada	800	-			Akerblom
Syrien	200	-			Akerblom
USA	150	-			Akerblom



Baulicher Radonschutz im Neubau und Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden

Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig

1. Einführung

1.1 Einflussfaktoren auf die Radonbelastung in Gebäuden

Die Einflüsse auf die Radonbelastung in Gebäuden sind außerordentlich vielfältig. W. Löbner und H. Schulz haben in ihrem Beitrag zu dieser Tagung [1] die Zusammenhänge und Randbedingungen, die zwischen der Entstehung der Radonbelastung im Erdreich, dessen Transport sowie Übergang in das Gebäude bestehen, ausführlich beschrieben, weswegen im Folgenden lediglich die für den baulichen Radonschutz wichtigen Zusammenhänge noch einmal zusammengefasst werden.

Insgesamt können fünf Gruppen von Einflussfaktoren für die Radonbelastung in Gebäuden ausgemacht werden:

- Radonbelastung im Boden
- Radonbelastung aus den verwendeten Baumaterialien
- Druckunterschiede zwischen innen und außen sowie innerhalb der Gebäude
- Dichtheit der Gebäudehülle
- Luftwechsel im Gebäude

Die Radonbelastung der Bodenluft unterliegt auf Grund geogener sowie anthropogener Randbedingungen einer hohen Bandbreite. Die durchschnittliche Bodenradonbelastung liegt in Deutschland unterhalb 20kBq/m^3 . Während in etwa 85% der Gebiete Deutschlands der Wert von 20kBq/m^3 nicht überschritten wird, werden in den verbleibenden Gebieten Radonbelastungen der Bodenluft deutlich darüber, mit Extremwerten von über 500kBq/m^3 beobachtet. Letztendlich sind lediglich diese etwa 15% der Fläche für das radonsichere Bauen interessant. Einen groben Überblick über die Bodenradonbelastung gibt die im Radon-Handbuch Deutschland [2] abgebildete Karte. Vor allen Dingen für die Gebiete mit hoher Bodenradonbelastung existieren zum Teil genauere regionale Karten.

Für das Verhältnis zwischen Bodenradonkonzentration und der Radonbelastung in Gebäuden sind in erster Linie die Druckunterschiede zwischen dem Gebäudeinneren und dem angrenzenden Erdreich sowie die mehr oder weniger große Dichtheit der an das Erdreich grenzenden Gebäudehülle ausschlaggebend. Die Druckunterschiede bilden sich infolge von Temperaturunterschieden zwischen Gebäudeinnerem und Erdreich sowie durch die auf das Gebäude einwirkenden Windlasten heraus. Hohe Temperaturunterschiede führen zu großen Druckunterschieden, für die aus Windlasten entstehenden Druckunterschiede sind neben der Windgeschwindigkeit die Gebäudeform sowie die Dichtheit der oberirdischen Gebäudehülle maßgeblich. In anderem Zusammenhang hat W.-H. Pohl [3] der Problematik der Druckunterschiede innerhalb eines Gebäudes eine ausführliche Ausarbeitung gewidmet. Danach sind die Druckunterschiede eine stark variierende Einflussgröße, wobei tendenziell in der kalten Jahreszeit größere Werte als im Sommer zu erwarten sind.

Absolut dichte Gebäudehüllen sind baupraktisch nicht zu realisieren – und auch nicht gewünscht. Somit wird immer – dem Druckgefälle folgend – ein Luftstrom vorhanden sein. Dabei müssen – wie bereits durch Löbner und Schulz gezeigt – konvektive und diffusive Strömungsvorgänge unterschieden werden. Konvektive Strömungen sind überall dort vorhanden, wo Undichtheiten in der Gebäudehülle eine direkte Luftströmung ermöglichen. Für die Größe der Diffusion sind dagegen die Diffusionsdichtheit der Baustoffe sowie deren Dicke verantwortlich. Der durch Konvektion bedingte Luftaustausch ist zumeist in Dimensionen höher als der durch Diffusion.

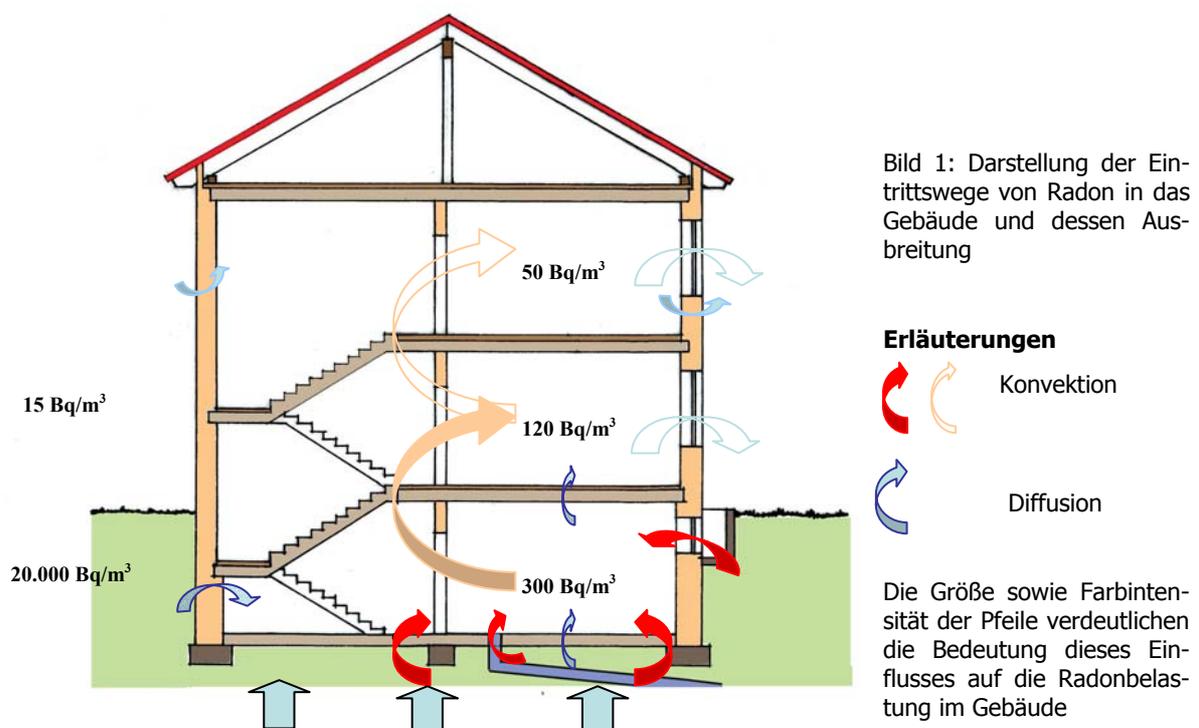
Weit geringeren Einfluss auf die Radonbelastungen in Gebäuden hat zumeist der Radongehalt der eingesetzten Baustoffe. Ausnahmen hiervon sind dann zu beobachten, wenn eine vergleichsweise dichte Gebäudehülle vorliegt und gleichzeitig Baumaterialien mit hoher Radonaktivität eingesetzt worden sind. Hinweise, welche Baustoffe eine erhöhte Strahlenexposition aufweisen, können u. a. aus [1], [2] und [4] entnommen werden. Für eine vertiefende Beschäftigung mit dieser Problematik sind in den hier aufgeführten Literaturen weiterführende Quellen aufgeführt.

Die Radonbelastung durch Außenluft ist für die in Gebäuden vorhandene Radonbelastung i. A. ohne Bedeutung, da in aller Regel die Werte deutlich unter denen in den Räume liegen (In Bild 1 ist eine solche typische Radonverteilung dargestellt). Selbstverständlich sind auch hier Ausnahmen möglich, allerdings sind diese sehr selten zu beobachten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine lineare Korrelation zwischen Radonbelastung in der Bodenluft bzw. dem Grundwasser und dem Radongehalt in Gebäuden nicht angenommen werden kann. Vor allen Dingen lassen sich aus Radonkarten keine direkten Schlüsse auf die Radonbelastung im Gebäude ziehen. Hier ist lediglich eine sehr grobe Abschätzung dahingehend denkbar, dass für Gebiete mit sehr niedriger Bodenradonbelastung (z.B. unter 10 kBq/m^3) mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch in den Gebäuden nur geringe Belastungen zu erwarten sind. Trotzdem ist die Radonbelastung der Bodenluft ein wichtiges Kriterium für den Radongehalt im Gebäude und im Wirkungszusammenhang von Dichtheit der Gebäudehülle, Luftdruckunterschieden sowie Luftaustausch in den Räumen für deren Größe maßgeblich verantwortlich. Alle weiteren hier aufgeführten Kriterien haben dagegen nur untergeordnete Bedeutung.

1.2 Eintrittswege und Verteilung des Radons im Gebäude

Genau wie der Eintritt des Radons durch die Druckunterschiede sowie Undichtheit der Gebäudehülle zwischen außen und innen beeinflusst wird, kann die weitere Verteilung des Radons im Gebäude durch diese beiden Faktoren beschrieben werden. Ein weiterer sehr wichtiger Faktor für die Höhe der Radonbelastung in der Raumluft ist die Luftaustauschrate in den Räumen.



In Bild 1 sind die konvektiven sowie durch Diffusion begründeten Luftbewegungen prinzipiell dargestellt. Die beispielhaft angegebenen Radonkonzentrationen repräsentieren einen typischen Fall, wonach die Radonkonzentration in den Kellerräumen gegenüber der Bodenradonluft in etwa um 2 Di-

mensionen sowie die Konzentration in der Außenluft um eine weitere Dimension geringer ist. Des Weiteren ist für die Radonbelastung in Gebäuden typisch, dass diese nach oben hin abnimmt.

1.3 Gebäudearten

Die baulichen Maßnahmen des Radonschutzes sind im Neubau deutlich von den Maßnahmen bei der Sanierung bestehender Gebäude zu unterscheiden.

Hinsichtlich des Gebäudebestandes wäre eine weitere Untergliederung, z.B. nach dem Baualter, der konstruktiven Lösung oder aber, ob eine Teil- oder Vollunterkellerung vorhanden ist, durchaus zweckmäßig, da hier auch deutliche Unterscheidungen hinsichtlich der Radonbelastung zu beobachten sind. In Ansätzen ist dies durch T. Rehle [5] untersucht worden, eine schlüssige Lösung muss aber durch weitere Untersuchungen noch gefunden werden.

Weitere Unterscheidungen, zum Beispiel nach der Nutzung der Gebäude sind für die Entscheidung, welche baulichen Radonschutzmaßnahmen anzuwenden sind, vor allem hinsichtlich der Nutzungsdauer der Räume von Bedeutung.

2. Radonschutzmaßnahmen im Planungs- und Bauprozess

Zunächst einmal ist zu klären, auf Grund welcher Randbedingungen Radonschutzmaßnahmen erforderlich werden. Leider gibt es auf diese Frage keine eindeutige Antwort, zu vielschichtig sind die zu berücksichtigenden Faktoren. Da ist zum ersten die Frage zu beantworten, welche Grenzwerte der Radonbelastung in genutzten Räumen zu einem gesundheitlichen Risiko führen und – in engem Zusammenhang damit – welche nationalen bzw. internationalen Grenz- oder Empfehlungswerte einzuhalten sind. Auf die Frage, ab welcher Konzentration die Radonbelastung zu gesundheitlichen Risiken führt, wird J. Conrady [6] im folgenden Beitrag eingehen. Dass hier keineswegs eine klare und eindeutige Aussage getroffen werden kann, zeigt sich im Umkehrschluss auch bei Betrachtung der Grenz- oder Empfehlungswerte, welche im Anhang zum Vortragsmanuskript von R. Lehmann [7] zusammengestellt sind. Aus dieser Übersicht geht hervor, dass es hier durchaus unterschiedliche Einstiegs- und Herangehensweisen gibt. In Deutschland sind – wie in fast allen europäischen Ländern – derzeit keine Grenzwerte gesetzlich festgelegt, wohl aber wurden Empfehlungswerte definiert. Diese im Folgenden zusammengestellten Werte beruhen auf Empfehlungen der europäischen Kommission, sie sind u. a. im Radon-Handbuch Deutschland [2] veröffentlicht. Die Werte sind langfristige Mittelwerte der Radonkonzentration.

- Im **Neubau** sollte die Radonbelastung in genutzten Räumen 200 Bq/m^3 nicht überschreiten.
- Im **Altbau** werden zwei Werte genannt: 400 Bq/m^3 als Zielwert für Sanierungen und 1000 Bq/m^3 als ein Wert, bei dem Sofortmaßnahmen – unabhängig davon, ob eine Sanierungsmaßnahme geplant ist – ergriffen werden sollten.

Diese hier genannten Werte haben – wie bereits gesagt – Empfehlungscharakter, sie stehen stellvertretend für einen Zielkorridor. Inwieweit diese Werte die tatsächlichen Gesundheitsgefährdungen richtig berücksichtigen und wie die künftige Entwicklung der Werte zu erwarten ist, soll hier nicht diskutiert werden. Bei extrem hohen Ausgangswerten der Radonbelastung kann aber auch als Erfolg verbucht werden, wenn eine deutliche Reduzierung erreicht wurde, der empfohlene Wert aber verfehlt wird.

Methodisch ist zwischen Neubau sowie Sanierung ein deutlicher Unterschied in der Herangehensweise zu beachten: Während im bestehenden Gebäude als Ausgangswert die in den Räumen gemessene Radonbelastung zugrunde gelegt werden kann, muss beim Neubau in einer ersten Untersuchungsstufe – vor Baubeginn – die Bodenradonbelastung zur Beurteilung herangezogen werden. Für beide Betrachtungsfälle aber gilt, dass zum baulichen Radonschutz immer die Kontrolle nach erfolgter Baumaßnahme gehört.

Die folgenden Diagramme (Bilder 2 und 3) zeigen nach [2] die Durchführung der Radonmessungen sowie Entscheidungen zum Radonschutz für Neubauten und in der Sanierung.

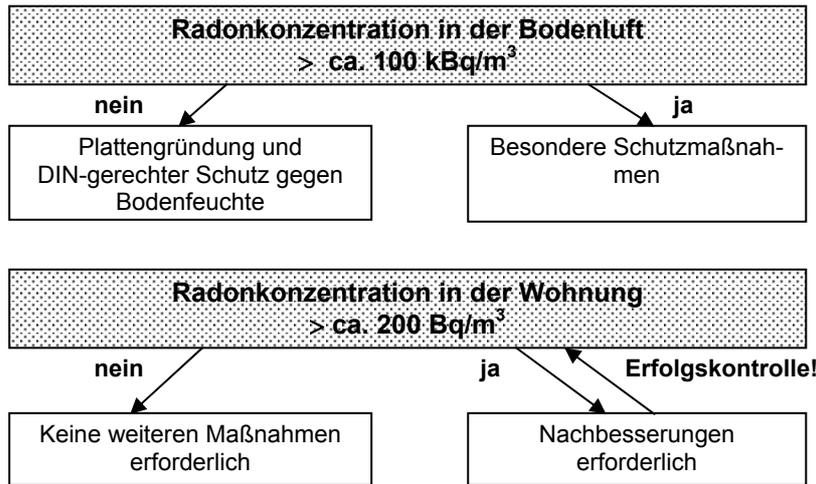


Bild 2: Planung des Radonschutzes bei Neubauten

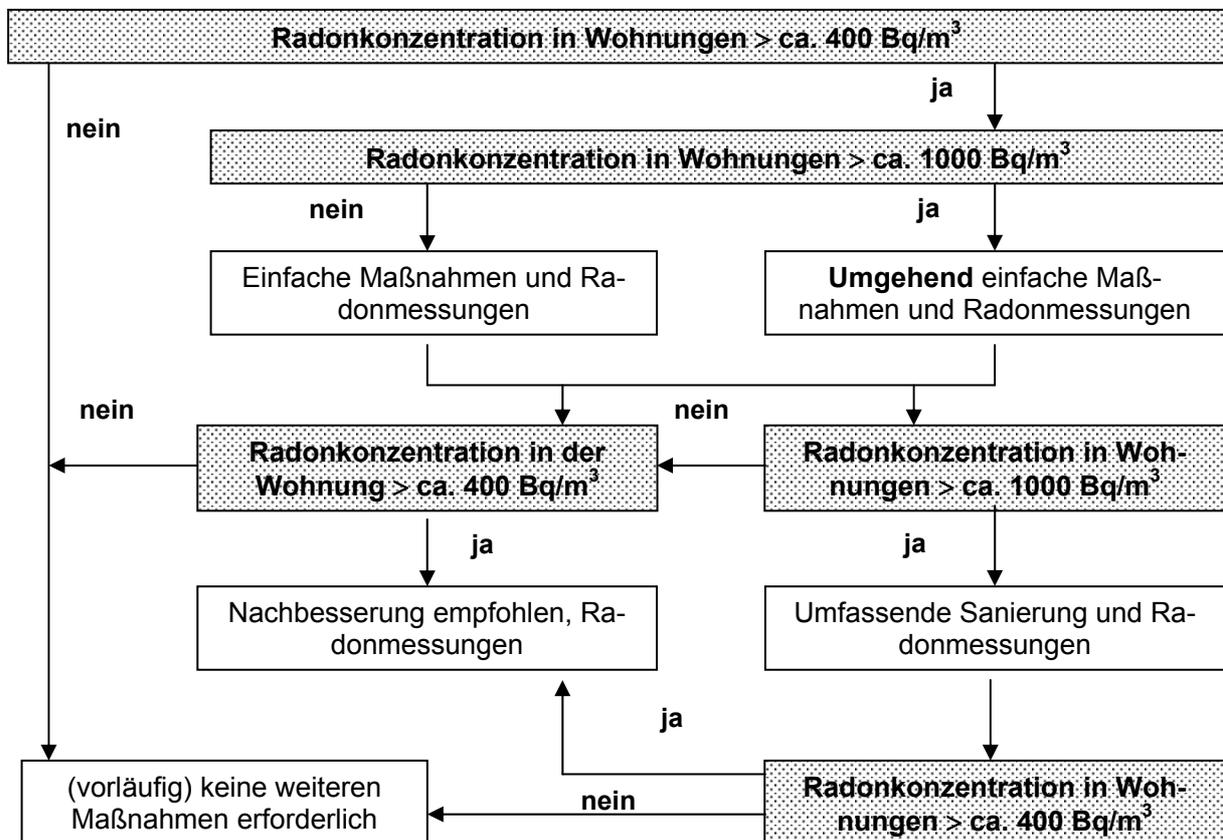


Bild 3: Planung des Radonschutzes bei der Sanierung

3. Baulicher Radonschutz

3.1 Übersicht

In Abschnitt 1.2 wurde bereits auf die Eintrittswege und die Verteilung des Radons im Gebäude eingegangen. Um die Radonbelastung zu senken bzw. bei Neubauten von vornherein auf eine akzeptable Größe zu begrenzen, können die folgenden baulichen Maßnahmen zur Anwendung kommen:

- Abdichtung der erdberührten Gebäudeteile
- Lüftungstechnische Maßnahmen zur Reduzierung bzw. Umkehr der Druckunterschiede zwischen Gebäudeinnerem und Baugrund
- zügige Ableitung von radonbelasteter Luft aus den Räumen.

Häufig werden diese Maßnahmen kombiniert angewendet.

Ergänzend sind auch konzeptionelle Maßnahmen in die Überlegungen einzubeziehen. Die Übersicht in Bild 4 zeigt die hier aufgeführten Möglichkeiten den Schwerpunktaufgaben Altbausanierung und Neubau zugeordnet.

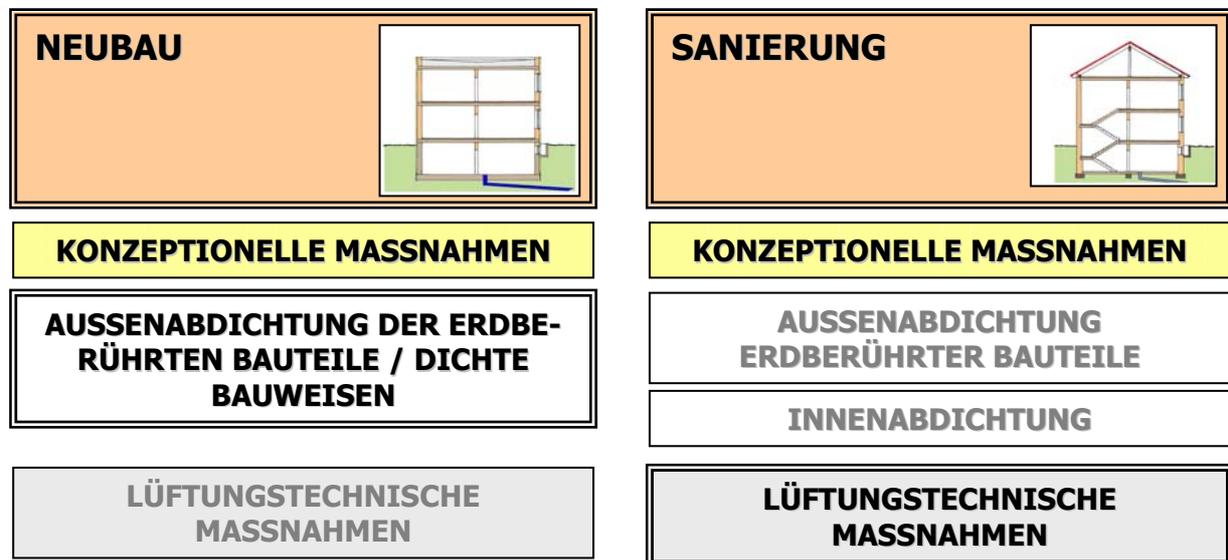


Bild 4: Übersicht und Zuordnung der Radonschutzmaßnahmen

3.2 Erhöhung der Radonkonzentration in Gebäuden nach baulichen Veränderungen sowie Nutzungsänderungen

Bevor in den folgenden Abschnitten auf die Möglichkeiten eingegangen wird, wie die Radonkonzentration in genutzten Räumen gesenkt werden kann, soll auf die Gefahr verwiesen werden, dass durch bauliche Veränderungen oder aber Nutzungsänderungen eine Vergrößerung der Radonkonzentration entstehen kann. Solche Ergebnisse sind immer dann zu beobachten, wenn die Mechanismen, die zu einer erhöhten Radonkonzentration führen, nicht berücksichtigt werden. Die wichtigsten Szenarien sollen im Folgenden genannt und kurz kommentiert werden:

1. Der Einbau dichter Fenster im Rahmen einer energetischen Sanierung führt dann zu einer - zum Teil deutlichen - Erhöhung der Radonkonzentration, wenn nicht gleichzeitig abdichtende Maßnahmen aller an das Erdreich angrenzenden Bauteilen bzw. weitere Lüftungstechnische Radonschutzmaßnahmen ergriffen werden. Auf diesen Zusammenhang wird J. Conrady in seinem Beitrag [6] noch näher eingehen.
2. Werden Kellerräume zu Wohn- und Arbeitsräumen umfunktioniert, kann das ebenfalls zu einer Erhöhung der Radonbelastung der Nutzer führen, da zum einen, wie in Abschnitt 1.2 gezeigt, die Radonbelastung in Kellerräumen in der Regel besonders hoch ist und zum Zweiten sich durch die Beheizung der Kellerräume das Temperaturniveau und somit die Druckdifferenzen zwischen Erdreich und Gebäudeinnerem erhöhen.

3. Der Einbau von Abluftanlagen in den Nassräumen eines Gebäudes mit kontrolliertem Nachströmen von Luft aus allen weiteren Räumen führt zum Aufbau eines Unterdruckes im Gebäude. Wenn der Wirkungsbereich des Abluftsystems auch - gewollt oder nicht - den Keller mit einbezieht, führt das zwangsläufig zu erhöhten Druckdifferenzen sowie zum verstärkten Einströmen radonhaltiger Bodenluft ins Gebäude.

Weitere Szenarien sind denkbar, bei denen eine Erhöhung der Radonbelastung eintritt. Zusammenfassend kann aber gesagt werden, dass bei Kenntnis der Wirkungsmechanismen, wie radonhaltige Bodenluft ins Gebäude eindringt und sich verteilt, diese ungewollten Folgen verhindert oder doch deutlich eingegrenzt werden können.

3.3 Konzeptionelle Maßnahmen

Hierunter werden Maßnahmen verstanden, bei denen das Nutzungskonzept des Gebäudes so gestaltet wird, dass die Wohn- und Arbeitsräume durch ein geschicktes Entwurfskonzept gut geschützt sind. Beispielweise betrifft das die folgenden Maßnahmen:

- besonders belastete Räume und Raumbereiche (zum Beispiel Kellerräume) werden aus der Nutzung für Wohn- und Arbeitsräume heraus genommen.
- Der Kellerzugang wird nicht unmittelbar von den ständig genutzten Bereichen aus eingerichtet.

Hier sind also nur bedingt bauliche Maßnahmen zusammen gefasst. Sie können sowohl bei der Neuplanung von Gebäuden als auch im Rahmen einer Sanierung angewendet werden.

3.4 Abdichtungen

3.4.1 Radondichtheit von Baustoffen

Die Radondichtheit von Baustoffen ist keine genormte Größe. Nach Keller/Hoffmann [8] kann ein Baustoff/Bauteil dann als radondicht bezeichnet werden, wenn

- die Schichtdicke der Baustoffe $[d] \geq 3 \cdot$ der Relaxationslänge $[R]$ ist, wobei die Relaxationslänge R mit $R = (D/\lambda)^{1/2}$ definiert wird mit:
 - D : Diffusionskoeffizient
 - λ : Zerfallskonstante für Radon ($\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6}$ für Rn^{222})
- Wird die Radondichtheit nach der hier aufgeführten Definition erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass der Diffusionsprozess durch den Baustoff so lang dauert, dass die Halbwertszeit von Radon (3,8 Tage) deutlich überschritten wird und der radioaktive Zerfall zu mehr als 90% im Baustoff stattfindet.

Eine auch nur annähernd vollständige List der Baumaterialien hinsichtlich ihrer Radondichtheit existiert nicht, in [2], sowie ausführlicher in [8] und [10] sind aber Zusammenstellungen von Baustoffen und Bauteilen enthalten. Y. Hauswald hat in ihrer Diplomarbeit [11] die Quellen ausgewertet und tabellarisch zusammengestellt. Einige Werte sind auszugsweise in Tabelle 1 wiedergegeben (siehe nächste Seite).

Zwar ist die Radondichtheit von Baumaterialien und Baukonstruktionen eine wichtige Größe und beschreibt vor allen Dingen den Diffusionswiderstand der Konstruktion, viel wesentlicher ist aber die Frage des Einbaues der Baumaterialien und hier insbesondere die Frage, inwieweit Risse innerhalb der Baustoffe oder aber im Grenzbereich zwischen verschiedenen Bauteilen entstehen können, da letztere für die konvektiven Vorgänge verantwortlich sind.

Tabelle 1: Radondichtheit von Baustoffen und Bauteilen (Beispiele aus [2], [8] und [10] zitiert nach [11])

Nr.	Bezeichnung	Dicke d	d/R	radondicht	Quelle
		mm	-	(d/R > 3)	
Abdichtungsstoffe					
1	Elastomer-Bitumen-Schweißbahn	4	17,60	ja	[8]
2	Elastomer-Bitumen-Dampfsperre, mit Alu-Folie kaschiert	3	10,80	ja	
3	PEHD Dichtungsbahn	3,5	21,50	ja	
4	PEHD Dichtungsbahn	1	7,01	ja	
5	Bitumenschweißbahn	4	2,00	nein	
6	Zweikomponenten Kunststoff-Bitumendickbeschichtung	4 bis 5	11,50 bis 12,90	ja	
7	Zweikomponenten-Bitumendickbeschichtung	5	6,50	ja	
8	Bitumenschweißbahn	5	0,04	nein	
9	Silikon-Kautschuk Fugendichtmasse	8		ja	
Anstrichstoffe, Beschichtungen					
10	Kunststoffanstrich rolan 100 s	8		ja	[8]
11	Kunststoffbeschichtung onit 1K	1	0,29	nein	
12	Lackfarbe	0,5	0,02	nein	[10]
13	Spritzmörtel	24	0,40	nein	[8]
14	Kunststoffdispersionsanstrich	1	0,01	nein	
15	Epoxydharz-Versiegelung	3		ja	[2]
Wandbaustoffe, Beton					
16	Kalksandstein	150	0,38	nein	[10]
17	Mauerziegel	150	0,37	nein	
18	Leichtbeton mit Blähton	100	0,13	nein	
19	Normalbeton	100	1,73	nein	
20		200	3,46	ja	
21	Sandstein	200	0,20	nein	
22	Gipsbauteile	100	0,09	nein	

3.4.2 Außenabdichtung

Außenabdichtungen an erdberührten Bauteilen sind die wichtigsten Maßnahmen des baulichen Radonschutzes bei Neubauten. Werden diese in Anlehnung an DIN 18 195 [12] gewissenhaft ausgeführt, sind beste Voraussetzungen geschaffen, das ein hoher Radonschutz erreicht wird. In Bild 5 ist nach [13] eine typische Lösung für eine Abdichtung des Kellers und der Bodenplatte dargestellt, die die Anforderungen an einen guten Radonschutz gleichermaßen erfüllt. Problemzonen sind hier in erster Linie Durchdringungen von Leitungen. Abgedichtete Rohrdurchführungen sind aber ebenfalls baulich relativ sicher realisierbar. Hier sollten Lösungen zur Anwendung kommen, die für druckwasserhaltende Abdichtungen entwickelt worden sind, da diese ohnehin sehr dicht sein müssen. In Bild 6 ist beispielhaft aus den Lehrbriefen „Bauwerksabdichtung“ [14] eine Prinziplösung für eine dichte Wanddurchführung wiedergegeben. Fußbodenabläufe in Nassräumen sind allerdings besonders gefährdet, da hier die radonhaltige Bodenlauf nicht nur im Übergang Einlaufteil – Bodenplatte, sondern

auch über das Abflussrohr eindringen kann. Werden Bodenabläufe bei hoher Bodenradonbelastung erforderlich, sollten deshalb weitere Maßnahmen (konzeptionelle und lüftungstechnische Maßnahmen sowie eine gute Abdichtung des betroffenen Raumes gegen alle weiteren Gebäudebereiche) getroffen werden.

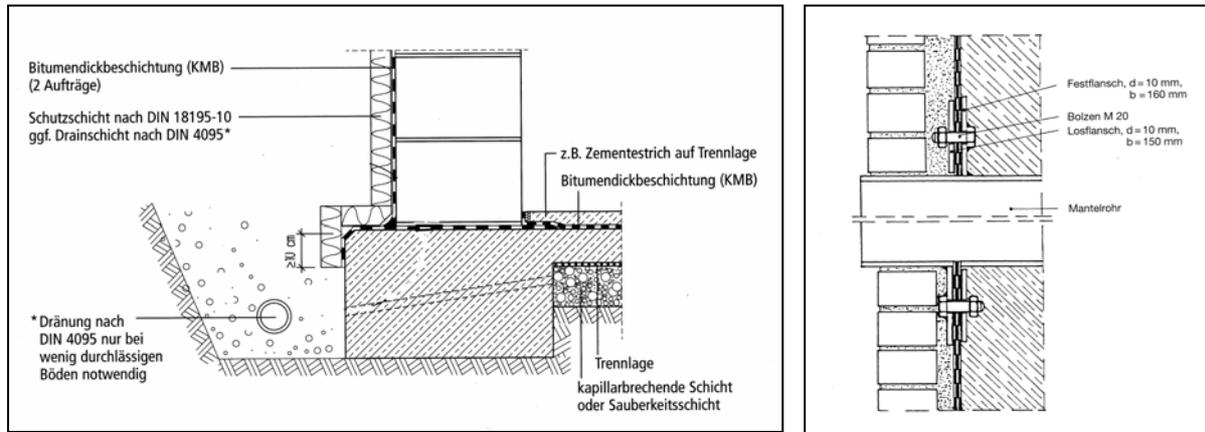


Bild 5: Regellösung für Anschluss Abdichtung der Bodenplatte zur Wand (nach [13]).

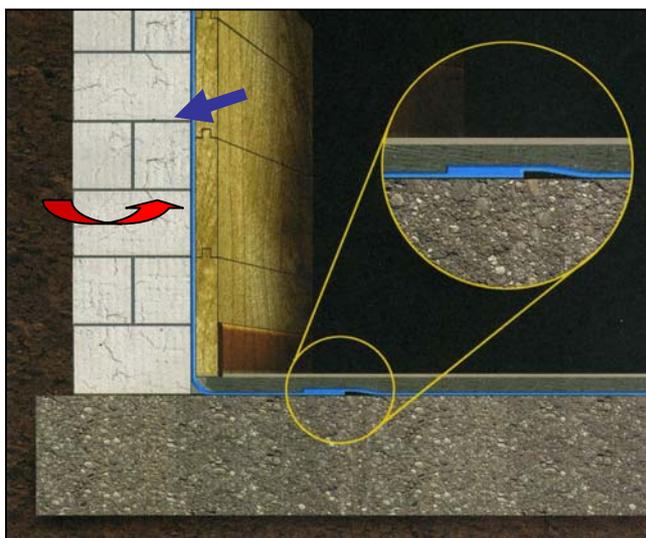
Bild 6: Beispiellösung einer dichten Rohrdurchführung durch eine Wand (nach [14])

Nachträgliche Außenabdichtungen im Altbau sind sehr aufwändig und teuer. Zudem kommt hier neben der Problematik der Abdichtung von Wanddurchführungen noch das Problem des Einbaus von Querschnittsabdichtungen in Wänden hinzu. Hierfür sind eine Reihe von Verfahren bekannt (u. a. Sägeverfahren, Injektagen usw.), die aber entweder schwer zu realisieren oder aber in der erreichten Wirksamkeit nicht 100%-ig eingeschätzt werden können und in jedem Falle sehr teuer sind. In besonderen Konstellationen (z.B. Natursteinwände mit großer Dicke) kann es ganz ausgeschlossen sein, eine funktionierende Querschnittsabdichtung einzubauen.

3.4.3 Innenabdichtung

Für Altbauten wird gelegentlich, zum Beispiel in [2] und [9] vorgeschlagen, Innenabdichtungen von bestehenden Bodenplatten und Kellerwänden einzubauen, um den hohen baulichen und finanziellen Aufwand für eine nachträgliche Außenabdichtung zu vermeiden.

In Bild 7 ist beispielhaft eine solche Lösung dargestellt (nach [2]).

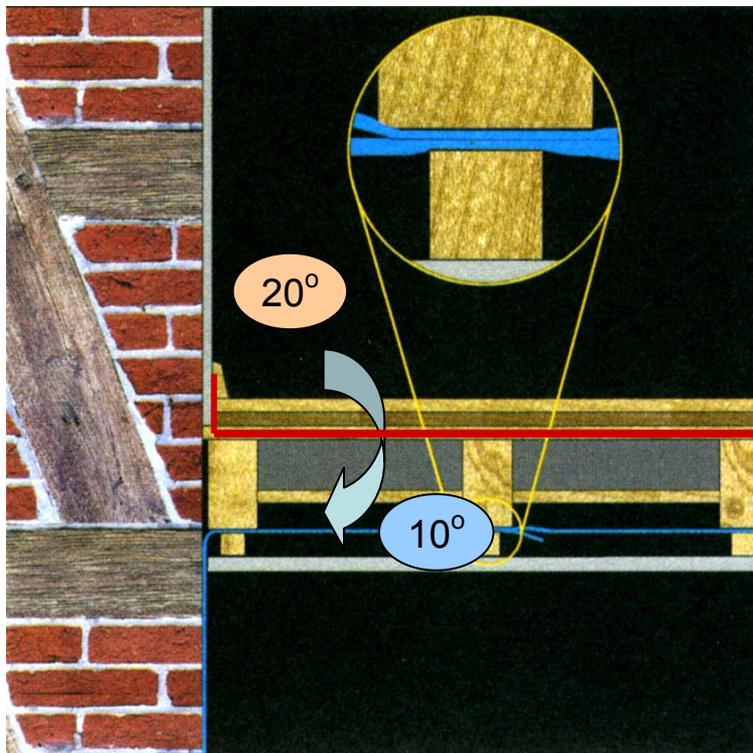


Unabhängig vom Radonschutz stellt eine solche Innenabdichtung eine höchst problematische Lösung dar, da dadurch in aller Regel eine Erhöhung der Feuchte- und Salzbelastung der Außenwände zu beobachten ist (s. roter Pfeil), die bei ungünstiger Konstellation zu einem Aufsteigen der Feuchte in den Außenwänden bis weit über das Geländeniveau führen kann. Zudem ist die Innenabdichtung anfällig, dass diese durch – unwissende – Nutzer zerstört wird (s. blauer Pfeil). Die Probleme von Durchdringungen sind für Innenabdichtungen analog denen bei Außenabdichtungen zu sehen.

Innenabdichtungen sollten deshalb keine Option für die Radonsanierung sein.

3.4.4 Abdichtungsmaßnahmen in Gebäuden

Um Bereiche erhöhter Radonkonzentration (z.B. Keller) von genutzten Raumbereichen abzugrenzen, sind ebenfalls im Gebäudeinneren abdichtende Maßnahmen vorzusehen.



Das betrifft in erster Linie Geschossdecken zwischen den Bereichen, wenn diese nicht bereits dicht sind. Während das von Betondecken grundsätzlich angenommen werden kann, müssen ältere Holzbalkendecken nachträglich abgedichtet werden. Hierzu ist im Radonhandbuch [2] die Prinziplösung einer unterseitigen Abdichtung wiedergegeben. Diese lässt sich relativ einfach realisieren, ist aber bauphysikalisch nicht ganz unproblematisch, da hier die Abdichtung – bauphysikalisch falsch – an der kalten Bauteilseite angeordnet ist. Deshalb wurde in Bild 8 die Darstellung aus dem Radonhandbuch durch eine oberseitige Abdichtung ergänzt (rote Linie). Wird die Lösung in der hier dargestellten Weise geplant, ergibt sich eine bauphysikalisch sowie radon-schutzmäßig sichere Lösung.

Bild 8: Beispiel für die Abdichtung einer Holzbalkendecke (nach [2], ergänzt durch Uhlig)

Wesentlich problematischer sind Abdichtungen von innen liegenden Türen: Diese werden zum Öffnen und Schließen bewegt und haben deshalb eine umlaufende Fuge zur Wand. Die für Innentüren übliche leichte Bauart kann zudem zu Verformungen des Türblattes führen, wodurch die umlaufende Fuge vergrößert wird. Durchdringungen für Schlösser usw. sind ebenfalls Einfallstore für radonhaltige Luft. Eine vollständige Abdichtung ist deshalb nicht möglich. Sicher kann der Einsatz von rauchdichten Türen mit Anpressdichtungen zu einer deutlichen Reduzierung der Radonübertragung führen. Allerdings sind diese zum einen sehr teuer und haben zum anderen ein sehr hohes Gewicht. Die Funktionsfähigkeit solcher Abdichtungen muss ständig geprüft und ggf. erneuert werden. Die Nutzer müssen zudem darauf achten, dass Türen möglichst wenig geöffnet werden. Bei sehr hoher Radonbelastung sollte versucht werden, einen Pufferraum zwischen hochbelastetem Keller und Nutzungsbereich zwischen zu schalten. Wenn dieser Zwischenraum zusätzlich natürlich oder künstlich belüftet werden kann (s. Abschnitt 3.5.2), wird die Übertragung radonhaltiger Luft deutlich reduziert.

3.5 Lüftungstechnische Maßnahmen

3.5.1 Übersicht

Aus der Beschreibung der abdichtenden Maßnahmen geht hervor, dass diese insbesondere in der Sanierung bestehender Gebäude keine zweckmäßige bzw. ausreichende Lösung darstellen. Hier können lüftungstechnische Maßnahmen zu einem guten Erfolg bei vergleichsweise geringem Aufwand führen.

Tatsächlich gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, durch lufttechnische Maßnahmen die Radonkonzentration in den genutzten Räumen zu reduzieren. Diese lassen sich zusammengefasst den folgenden Gruppen zuordnen:

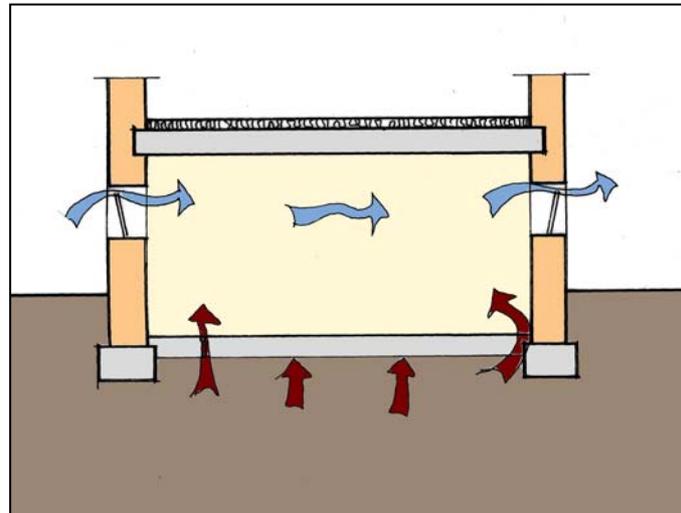
- Schaffung eines hohen Luftwechsels in hochbelasteten Räumen

- Reduzierung des Unterdrucks zwischen Gebäudeinnerem und Bodenluft bzw. Schaffung eines Überdrucks im Gebäude
- Schaffung eines Unterdruckes im an das Gebäude angrenzenden Erdreich.

3.5.2 Luftwechsel

Die Luftwechselrate von Räumen kann durch ständige Öffnung der Fenster (angekippte Fenster), durch täglich mehrmalige Stoßlüftung sowie durch technische Unterstützung (Abluftsysteme) gesteigert werden. Insbesondere in hoch belasteten Kellerräumen kann dies eine flankierende oder provisorische Maßnahme zur schnellen Reduzierung der Radonbelastung sein (siehe Bild 9). Nach [15] kann allerdings die Radonbelastung durch das Lüften um maximal 50% gesenkt werden und erfordert eine hohe Nutzerdisziplin.

Bild 9: Reduzierung der Radonbelastung in Kellerräumen durch Querlüftung



Problematisch sind neben der relativ geringen Wirkung die

- hohen Wärmeenergieverluste infolge des erhöhten Luftwechsels in den betrachteten Räumen sowie
- bei einfachen Lösungen (ohne technische Unterstützung des Luftwechsels) die sich verändernden Wind- und Temperaturverhältnisse

Die Reduzierung des Radongehaltes in der Raumluft durch erhöhtes Lüften sollte deshalb nur dann in Betracht gezogen werden, wenn die Räume nicht oder nur gering beheizt werden, da dann die Wärmeverluste nicht in Betracht gezogen werden müssen und wenn eine Interimslösung zur Reduzierung deutlich erhöhter Radonkonzentrationen erforderlich wird.

3.5.3 Einfache Maßnahmen zur Eliminierung des Unterdrucks im Keller

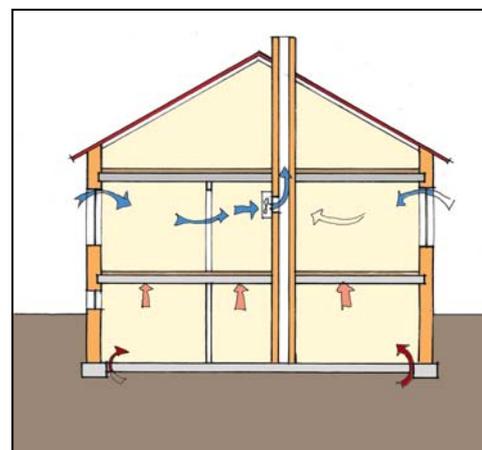
Zur Eliminierung des Unterdruckes im Keller sind relativ einfache bauliche und anlagentechnische Maßnahmen möglich, die in einigen Konstellationen zu guten Ergebnissen führen können, aber auf keinen Fall ein Allheilmittel darstellen.

Folgende Möglichkeiten sind bekannt:

1. Schaffung von oberirdischen Nachströmöffnungen: Diese Lösung kann dann angewendet werden, wenn Abluftanlagen in den Nassräumen eingebaut worden sind. Da diese Anlagen mit Unterdruck arbeiten, soll verhindert werden, dass die Nachströmluft aus dem Keller kommt. Bedingung für das Funktionieren dieser Lösung ist also, dass eine gute Abdichtung zum Keller hin vorhanden ist.

Bauklimatisch ist diese Lösung problematisch, da die angesaugte Luft i. A. direkt von außen kommt und im Winter deshalb zu Energieverlusten führt.

Bild 10: Nachströmöffnungen im Obergeschoss bei Abluftanlage



2. Direkte Zuluftführung zu Öfen und Heizungen:

Feuerungsstellen benötigen Verbrennungsluft. Normalerweise wird diese direkt aus dem Heizungsraum gezogen, weswegen dort ein Unterdruck entsteht. Wird hier eine direkte Luftansaugung von außen eingebaut, entfällt diese Unterdruck erzeugende Situation.

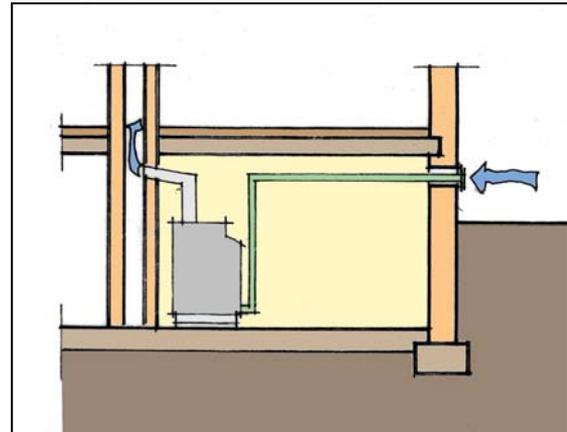


Bild 11: Direkte Luftzuführung zu Heizungen

3. Einbau von dichten Rauchrohrklappen

Kamine sind im Allgemeinen aus Sicherheitsgründen nicht absolut dicht gegen den Raum abgegrenzt. Durch den thermischen Auftrieb entsteht dadurch im angrenzenden Raum ein Unterdruck. In Ausnahmefällen (sehr hohe Bodenradonbelastung; Feuerungsstelle wird nicht ständig genutzt) können in Abstimmung mit dem Schornsteinfeger dicht schließende Rauchrohrklappen eingebaut werden.

3.5.4 Aufbau eines Unterdruckes im Boden

Wird unterhalb des Gebäudes ein Unterdruck aufgebaut, kann das Druckgefälle gegenüber dem natürlichen Fall umgekehrt werden, wodurch das Nachströmen der radonhaltigen Bodenluft ins Gebäude unterbunden wird.

Für die Schaffung des Unterdruckes gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Anwendung richtet sich nach den Bodenkennwerten, der Gebäudegröße und -gestalt, der Bauweise des Gebäudes usw. und ist immer im Einzelfalle und nach Radonmessungen der Ausgangssituation zu entscheiden. Stellt sich nach erfolgter Realisierung der gewünschte Effekt nicht oder nur zum Teil ein, sind ggf. ergänzende Maßnahmen erforderlich.

Es werden aktive und passive Systeme unterschieden. Während in aktiven Systemen mit Lüftern der Unterdruck erzeugt wird, muss für die Wirksamkeit passiver Systeme ein genügend großer Auftrieb vorhanden sein.

Im Folgenden sollen typische Lösungen kurz vorgestellt werden:

1. Entlüftung von Hohlräumen unter der untersten Geschosdecke (s. Bild 12)

In älteren Gebäuden besteht häufig unter dem untersten Fußboden ein Hohlraum. Durch diesen sollte der Fußbodenaufbau nicht mit der Erdfeuchte in Berührung kommen. Vielfach sind diese Hohlräume bereits mit der Außenluft verbunden.

Durch Einbau eines Lüfters oder durch Veränderung der bestehenden Öffnungen dahingehend, dass eine gute und vollständige Querlüftung erfolgen kann, wird in diesen Hohlräumen ein gezielter Unterdruck aufgebaut und durch die nachströmende Außenluft eine deutliche Reduzierung der Radonkonzentration erreicht.

Das Prinzip, Hohlräume unter dem Gebäude für die Abführung radonhaltiger Luft zu nutzen, kann auch beim Neuaufbau eines Fußbodens durch den Einbau eines Doppelbodens angewendet werden.

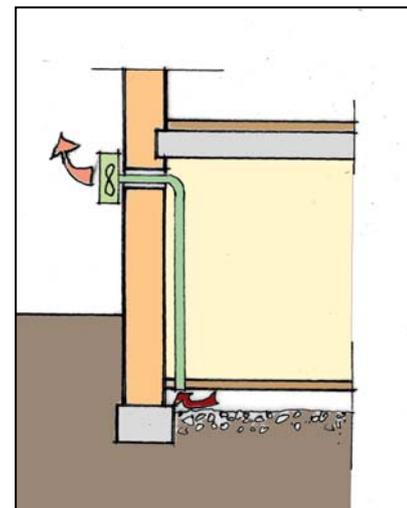


Bild 12: Hohlraum-Entlüftung

2. Einbau einer Bodendranage (s. Bild 13)

Der Einbau einer Bodendranage unter dem untersten Fußboden stellt eine relativ aufwändige Baumaßnahme dar und wird deshalb bei Neubauten oder dann angewendet, wenn eine umfangreiche Sanierung mit Neuaufbau des untersten Fußbodens geplant ist. Der Erfolg hängt maßgeblich davon ab, ob durch das Dränagesystem (mit angeschlossenem Lüfte) ein Unterdruck aufgebaut werden kann. Hierfür ist die Bodendurchlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Diese darf nicht zu groß sein, da dann ein ungehindertes Nachströmen zu beobachten ist. Ist der Boden sehr dicht, müssen die Dränageleitungen in einem engen Raster verlegt werden, damit ein Nachstromeffekt erzielt wird.

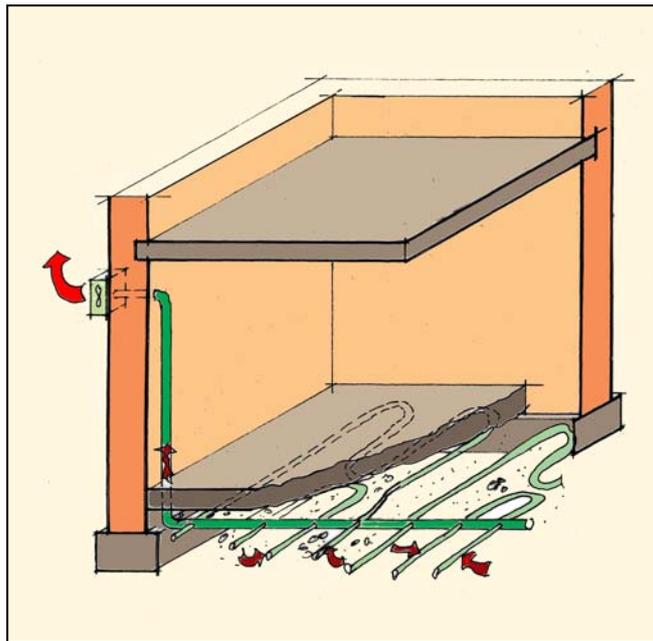
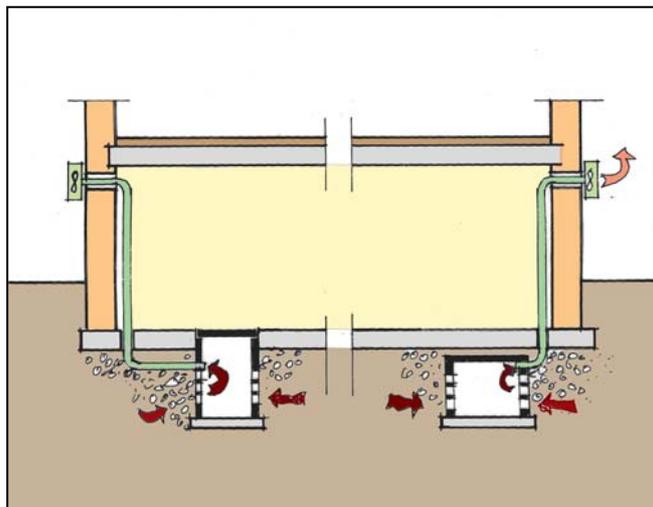


Bild 13: Flachendranage mit Abluftführung

3. Bodenluftabsaugung über Einzelschachte im Gebäudeinneren (s. Bild 14)

Diese Variante ist nach [15] besonders gut für bestehende Einfamilienhäuser bis zu einer Grundfläche von ca. 200 m² und ebener Bodenplatte geeignet. In diesen Fällen genügen zumeist ein Schacht von ca. 1,50 bis 2,00 m Tiefe und einem Durchmesser von 50 cm sowie ein Lüfte mit einer Leistung von ca. 24 Watt, um einen genügend großen Unterdruck aufzubauen.

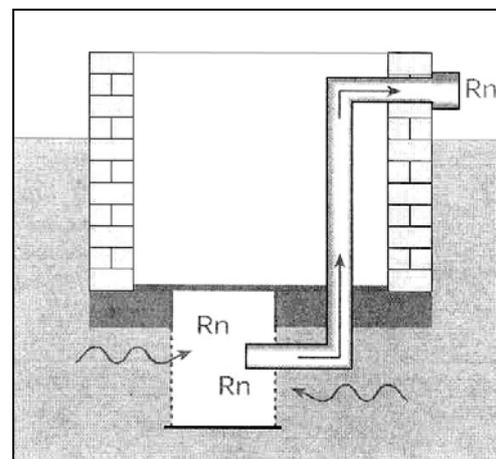


Die Kosten für den nachträglichen Einbau sowie den Betrieb der Anlage sind überschaubar, die Erfolgsaussichten liegen nach [15] bei 80 %.

Die Grenzen dieses Verfahrens sind dann erreicht, wenn – ähnlich wie bei Dränagesystemen - die Bodendurchlässigkeit (Permeabilität) so hoch ist, dass die Bodenluft zu leicht nachströmen kann und sich deshalb kein Unterdruck im Untergrund aufbauen kann bzw. die Lufteleistung deutlich gesteigert werden müsste. Des Weiteren sind bei unterschiedlichen Gründungsniveaus des Gebäudes ggf. mehrere Absaugstellen erforderlich.

4. Radonbrunnen (s. Bild 15 nach [16])

Der Radonbrunnen ist ein außerhalb des Gebäudes liegender Schacht, der mit dem umgebenden Erdreich in Verbindung steht. In dem



Schacht wird ein Lüfter angebracht, der einen ständigen Unterdruck erzeugt. Dadurch entsteht im angrenzenden Erdreich ebenfalls ein Unterdruck, die radonhaltige Luft strömt zum Schacht und wird ins Freie abgegeben. Mit dem Bau von Radonbrunnen wurden nach Rehle [5] in der Schweiz sowie in Schweden gute Erfolge erzielt. Auch hier ist eine gute Abstimmung der Permeabilität des Erdreiches für die Wirkung von entscheidender Bedeutung.

3.5.5 Überdruck unter Gebäuden

In [15] wird beschrieben, dass in Einzelfällen die Erzeugung eines Überdruckes in Gebäuden zu einem guten Erfolg geführt hat. Diese Methode wurde dann angewendet, wenn die Permeabilität des Bodens so hoch war, dass kein Unterdruck aufgebaut werden konnte. Wird in diesem Falle in bereits errichtete Einzelschächte oder Flächendrängen Luft geblasen, entsteht im Erdreich ein Überdruck, der einem Lufteintritt ins Gebäude entgegen wirkt und zu einer Verdünnung der radonhaltigen Bodenluft führt. Nach [15] wurde diese Methode dann angewendet, wenn alle sonstigen Maßnahmen versagt haben und hat dann zu guten Erfolgen geführt.

3.5.6 Überdruck in Gebäuden

Durch den Einbau eines Lüfters in der Außenwand eines Gebäudes kann sehr einfach ein leichter Überdruck erzeugt werden, der den Eintritt radonhaltiger Bodenluft deutlich reduzieren kann. Vor allen Dingen in Passivhäusern ist der Einbau eines Wärmeübertragers mit Wärmerückgewinnung Stand der Technik und wird zunehmend auch in „normalen“ Gebäuden eingesetzt (s Bild 16). Diese Technik kann sehr gut so gesteuert werden, dass ein leichter Überdruck im Gebäude entsteht. Durch das Gegenstromprinzip wird die Frischluft soweit vorgewärmt, dass die Energieverluste sehr gering sind.

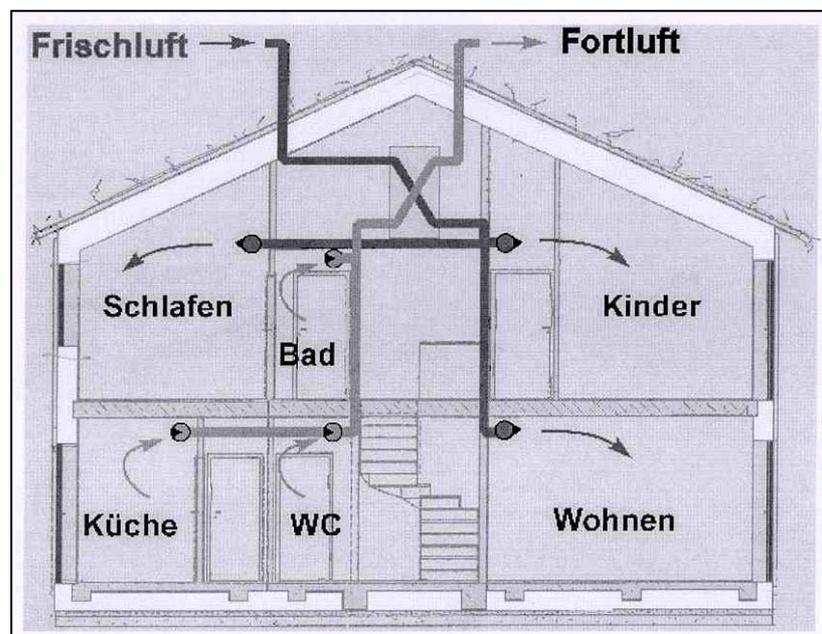


Bild 16: Gebäudeklimatisierung mit Wärmetauscher

4. Zusammenfassung

Für den Radonschutz von Gebäuden können auf eine Reihe von baulichen und lüftungstechnischen Maßnahmen zurückgegriffen werden. Bei frühzeitigem Einbezug des Radonschutzes in die Planung und Bauausführung können zumeist gute Ergebnisse zu erzielt werden.

Während im Neubau abdichtende Maßnahmen der erdberührten Bauteile zumeist bereits zu einem guten Erfolg führen und nur geringe oder keine Mehrkosten erfordern (da abdichtende Maßnahmen ohnehin gegen das Eindringen von Wasser erforderlich sind), sind in der Gebäudesanierung lüftungstechnische Maßnahmen zumeist die sinnvollsten Lösungen. Für den Erfolg aller baulichen Maßnahmen ist eine sehr gute Bauausführung unabdinglich. Ebenso ist in jedem Falle eine ständige Erfolgskontrolle erforderlich.

Literatur:

- [1] Löbner, Walfried und Hartmut Schulz: Wie und warum gelangt Radon in ein Haus? Dresden 2005
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Radon-Handbuch Deutschland, Bonn 2001
- [3] Pohl, Wolf-Hagen: Schadensfrei Planen und Bauen: Kampf gegen das Wasser, in: Tagungshandbuch Kalksandstein, Vortragsreihe 1998, Karlsruhe 1998
- [4] Bundesamt für Strahlenschutz, Infoblatt 03/02, Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide in Baumaterialien
- [5] Rehle, Torsten: Klassifizierung der in der BRD und in anderen europäischen Staaten vorhandenen Wohngebäudesubstanz und deren Systematisierung bezüglich notwendiger Sanierungsmaßnahmen zur Senkung der Radoninnenraumkonzentration unter besonderer Berücksichtigung der Belüftung der Häuser; Diplomarbeit HTW Dresden (FH), Dresden 2005
- [6] Conrady, Jürgen: Gesundheitsgefahren infolge Radon im Ergebnis von Maßnahmen zur Energieeinsparung – Möglichkeiten der Prognose, Dresden 2005
- [7] Lehmann, R.: Konzept zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte beim Aufenthalt in Gebäuden, Dresden 2005
- [8] Keller, G. und B. Hoffmann: Forschungen zum Problemkreis Radon, 14. Statusgespräch 2001
- [9] Radonhandbuch Schweiz; Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Fachstelle Radon und Abfälle, Bern
- [10] Bauforschungsbericht des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau: Radonisierte Häuser, Bauliche Vorschläge für den Neubau und für Sanierungsmaßnahmen, IRB-Verlag 1993
- [11] Hauswald, Yvonne: Radonbelastung in Neubauten; Diplomarbeit HTW Dresden (FH), Dresden 2004
- [12] DIN18 195, Bauwerksabdichtungen
- [13] Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB), 2. Ausgabe November 2001
- [14] Bundesfachabteilung Bauwerksabdichtung im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.: Lehrbriefe Bauwerksabdichtung, Berlin 2004
- [15] www.provinz.bz.it/umweltagentur/2908/radon: Labor für physikalische Chemie
- [16] Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: Radon in Gebäuden – Auswirkungen auf die Gesundheit, München 2004
- [17] www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D, Passivhaus Institut

Gesundheitsgefahren infolge Radon im Ergebnis von Maßnahmen zur Energieeinsparung - Möglichkeiten der Prognose

Dr. rer. nat. Jürgen Conrady

1. Grundlagen

Radon-222 ist ein radioaktives Edelgas, das im Boden aus dem Zerfall des Radium-226 entsteht und in die Atmosphäre entweicht. Damit ist diese Radionuklid praktisch überall in der Umwelt des Menschen vorhanden. In Gebäuden kann sich Radon-222 aufgrund des eingeschränkten Luftaustausches mit der Außenluft anreichern und bei erhöhten Bodenradonwerten hohe Konzentrationen erreichen.

Als radioaktives Element ist Radon-222 instabil und zerfällt in ein Tochternuklid, das wiederum selbst zerfällt so dass sich im Ergebnis dieser Zerfallskette in der Raumluft ein radioaktives Gemisch bestehend aus Radon-222 und seinen Tochternukliden bildet. Dieses Gemisch gelangt mit der Atemluft in die Lungen, wo die Tochternuklide des Radons aufgrund ihrer sehr kurzen Lebensdauer zerfallen und eine Strahlenbelastung des Lungengewebes verursachen.

Aus Untersuchungen an Radon exponierten Bergarbeitern und aus Tierexperimenten ist bekannt, dass diese Strahlenbelastung Lungenkrebs auslösen kann.

2. Gesundheitsrisiko der Bevölkerung durch Radon in Wohnungen

Die Analyse des Zusammenhanges zwischen der Höhe der Radonbelastung und dem Erkrankungsrisiko für Lungenkrebs zeigt bei den untersuchten Bergarbeitern einen dosisproportionalen, linearen Anstieg.

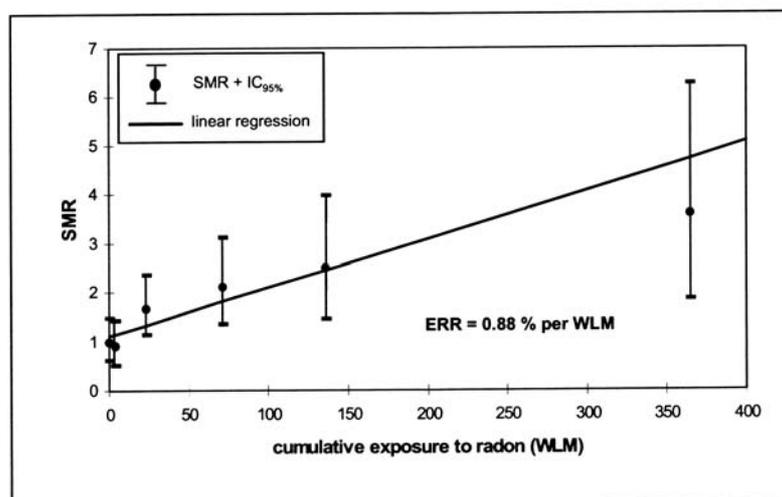


Abbildung 1: Dosiswirkungsbeziehung zwischen kumulativer Radonexposition und Lungenkrebsmortalität in der Kohorte französischer Uranbergarbeiter (1)

Bemerkenswert ist der Nachweis, dass selbst eine relativ geringe Radonexpositionen (z.B. 25 WLM) das Lungenkrebsrisiko der Bergleute signifikant erhöht.

Diese Exposition ist andererseits so gering, dass sie auch bei den in Wohnungen herrschenden Expositionsbedingungen erreicht und unter Umständen sogar deutlich übertroffen werden kann. Der Normalwert der Radonkonzentration beträgt in Deutschland 50 Bq/m^3 , wodurch bei einem 30-jährigen Aufenthalt $6,7 \text{ WLM}$ kumulative Exposition erreicht werden. Entsprechend werden bei 187 Bq/m^3 bereits 25 WLM erreicht und bei 1000 Bq/m^3 , 134 WLM .

Aus diesem Grund wurde gefolgert, dass die Radonexposition der Bevölkerung in Wohnungen ein wesentlicher Risikofaktor für Lungenkrebs sein könnte. In einer Vielzahl von Studien wurde diese Frage mit teilweise sehr widersprüchlichen Ergebnissen untersucht. Trotz der vorhandenen Widersprüche wurden die einzelnen Studien in mehreren Metaanalysen und gepoolten Analysen zusammengefasst und ausgewertet (2), (3), (4). Im Ergebnis wurde in allen gepoolten und Metaanalysen ein Zusammenhang zwischen der häuslichen Radonexposition und dem Lungenkrebsrisiko festgestellt. In allen Fällen war der Zusammenhang zwischen Risiko und Exposition linear (Abb. 2).

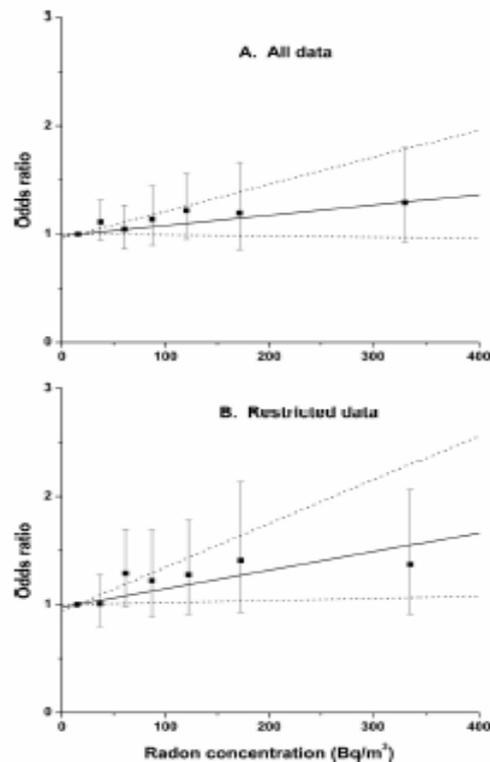


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen häuslicher Radonexposition und Lungenkrebsrisiko im Ergebnis einer kombinierten Analyse von 7 Nord Amerikanischen Fall-Kontroll-Studien (3662 Fälle, 4996 Kontrollen oben) (2). Unten: Beschränkte Analyse auf Probanden mit nur 1-2 Wohnungen während der letzten 5-30 Jahre (1 910 Fälle, 2 651 Kontrollen). Im letzteren Fall wird ein Exzessrisiko von 21% pro 100 Bq/m³ bestimmt.

In der europäischen kombinierten Analyse (3) von 13 Fall-Kontroll-Studien mit 7 148 Fällen und 14 208 Kontrollen wird ein Exzessrisiko von 16 % pro 100 Bq/m³ Exposition bestimmt.

Anders ausgedrückt, steigt das Lungenkrebsrisiko um 16% bei einer Exposition von 100 Bq/m³.

Die Studie der World Health Organisation (WHO) kommt zu ähnlichen Risikoschätzungen wobei aber hier bereits bei einer Exposition von 50 Bq/m³ ein signifikant erhöhtes Lungenkrebsrisiko festgestellt wird (Tabelle 1). Eine Verdopplung des Lungenkrebsrisikos würde dann bei einer Exposition von 625 Bq/m³ eintreten. Aus der amerikanischen Studie ergäbe sich ein Verdoppelung der Lungenkrebsrisikos bei einer Exposition von ca. 500 Bq/m³ und aus den Ergebnissen anderer, bisher nicht berücksichtigter aber auch sehr bedeutender Studien, lassen sich 250 Bq/m³ bzw. 143 Bq/m³ als die Exposition herleiten, bei der sich das Lungenkrebsrisiko der Bewohner entsprechender Wohnungen verdoppeln würde.

Es bleibt abzuwarten, wo im Ergebnis weiterer Metaanalysen die Risikoschätzungen letztlich enden werden, aber bereits jetzt wird die Radonexposition der Bevölkerung in Gebäuden als die nach dem Rauchen zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebs angesehen. In der entsprechenden Pressemitteilung des Bundesamtes für Strahlenschutz vom 01.02.2005 wird ausgeführt:

„Radon verursacht damit ungefähr 20 000 Lungenkrebsfälle in der Europäischen Union, davon etwa 3000 in Deutschland.

Personen die in Räumen leben, die eine Radonkonzentration zwischen 100-200 Bq/m³ aufweisen, haben ein um 20% erhöhtes Lungenkrebsrisiko im Vergleich zu Personen, die in Räumen unterhalb von 100 Bq/m³ leben. Somit liegt ein statistisch signifikant erhöhtes Lungenkrebsrisiko unterhalb der Radonkonzentration von 200 Bq/m³ vor.“

Tabelle 1: Zusammengefasste Ergebnisse (Odds-Ratio) einer Metaanalyse zum Zusammenhang zwischen häuslicher Radonexposition und Lungenkrebsrisiko pro 150 Bq/m³ Exposition.
Bemerkenswert ist das bereits statistisch signifikant erhöhte Lungenkrebsrisiko bei einer Radonexposition von 50 Bq/m³, die dem Normalwert in Deutschland entspricht. (4)

Blot et al. (1990)	0.95 (0.93–0.97)
Shoenberg et al. (1992)	3.06 (2.46–3.79)
Pershagen et al. (1992)	1.38 (1.37–1.40)
Alavanja et al. (1994)	1.07 (0.99–1.16)
Létourneau et al. (1994)	0.98 (0.93–1.04)
Pershagen et al. (1994)	1.18 (1.13–1.23)
Auvinen et al. (1996)	1.02 (0.99–1.04)
Ruosteenoja et al. (1996)	1.47 (1.05–2.04)
Darby et al. (1998)	1.16 (1.06–1.27)
Alavanja et al. (1999)	0.81 (0.72–0.90)
Field et al. (2000)	1.49 (1.35–1.65)
Sobue et al. (2000)	1.32 (0.63–2.73)
Kreienbrock et al. (2001)	1.03 (0.93–1.14)
Lagarde et al. (2001)	1.43 (1.19–1.72)
Pisa et al. (2001)	1.92 (1.06–3.50)
Wang et al. (2002)	1.19 (1.14–1.25)
Barros-Dios et al. (2002)	2.69 (1.34–5.39)
ZUSAMMEN	1.24 (1.11–1.38)

Nach Expositions-kategorien (Bq/m ³)	
50	1.07 (1.04–1.11)
100	1.15 (1.07–1.24)
200	1.33 (1.15–1.54)
250	1.43 (1.19–1.72)

3. Die Expositions-Situation in Sachsen und das Lungenkrebsrisiko der Bevölkerung

Die Expositionssituation der Bevölkerung Sachsens weist im Vergleich zu den anderen Bundesländern und weltweit einige Besonderheiten auf. Aufgrund des in relativ großen Gebieten erhöhten Uran-238 Gehaltes im Boden und im Ergebnis des mittelalterlichen und neuzeitlichen Bergbaus, ist die Radonkonzentration in Gebäuden der in diesen Regionen lokalisierten Kommunen im Vergleich zu anderen Regionen wesentlich höher (Abbildung 3).

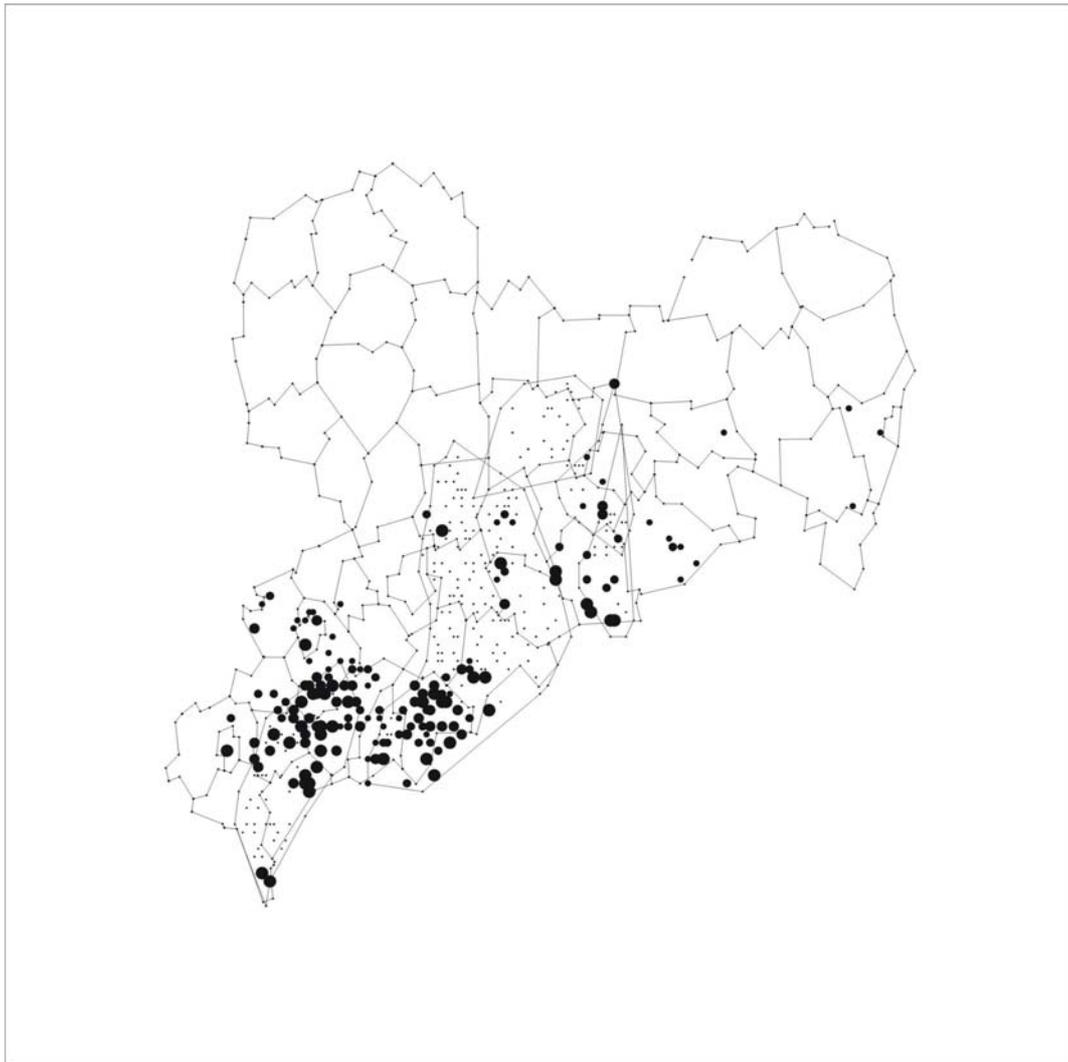


Abbildung 3: Übersichtskarte Sachsens mit schematischer Darstellung der Gebiete mit erhöhter Radonbelastung in Kommunen und Messwerten der Radonkonzentration (fette Punkte).

Der Durchmesser der Punkte ist der Höhe der Radonkonzentration proportional: $<111 \text{ Bq/m}^3$ unteres Quartil, $(111,196)$ bis Median, $(196,325) \text{ Bq/m}^3$ oberes Quartil, $\geq 325 \text{ Bq/m}^3$. (Kurzzeitmessungen, BfS)

Langzeitmessungen der Radonkonzentration einer Zufallsstichprobe die im Zeitraum von 1991/92 durchgeführt wurden, zeigen ebenfalls deutlich höhere Radonwerte in den Gemeinden, die in den Regionen mit erhöhter Radonbelastung lokalisiert sind. Innerhalb dieser Kommunen weichen einzelne Gebäude deutlich vom Durchschnitt der Radonkonzentration ab. Das betrifft ca. 10% der untersuchten Wohnungen. Der arithmetische Mittelwert der Radonkonzentration beträgt 89 Bq/m^3 und der Median 57 Bq/m^3 (Abbildung 4).

Unter diesen Voraussetzungen war es nahe liegend, die Daten des Krebsregisters der ehemaligen DDR heranzuziehen um die Frage zu prüfen, ob das Risiko an Lungenkrebs zu erkranken, in den in der Abbildung 3 dargestellten Kommunen erhöht ist. Der Untersuchungszeitraum umfasst die Jahre 1961-1989, wobei das Rauchverhalten, Geschlecht und Alter in der Analyse berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse zeigt die Abbildung 5 am Beispiel der Frauen, die aufgrund ihres hohen Nichtraucheranteils (95-98%), hohen Sesshaftigkeit (Aufenthaltsdauer in der letzten Wohnung ca. 35-38 Jahre) und geringeren beruflichen Exposition mit Lungenkrebs auslösenden Faktoren, die empfindlichste Indikatorgruppe der Bevölkerung darstellen. Ein Vergleich der tatsächlich im Beobachtungszeitraum von 1961-1989 in diesen Gemeinden aufgetretenen mit den nach Bevölkerungszahl und Altersverteilung der einzelnen Gemeinden zu erwartenden Lungenkrebsfälle zeigt, dass sogar weniger Fälle aufgetreten sind, als spontan erwartet werden konnten (Abbildung 5). Damit ist ein Radoneffekt, trotz der inzwischen sehr hohen Risikoschätzungen, unter diesen Bedingungen nicht nachweisbar.

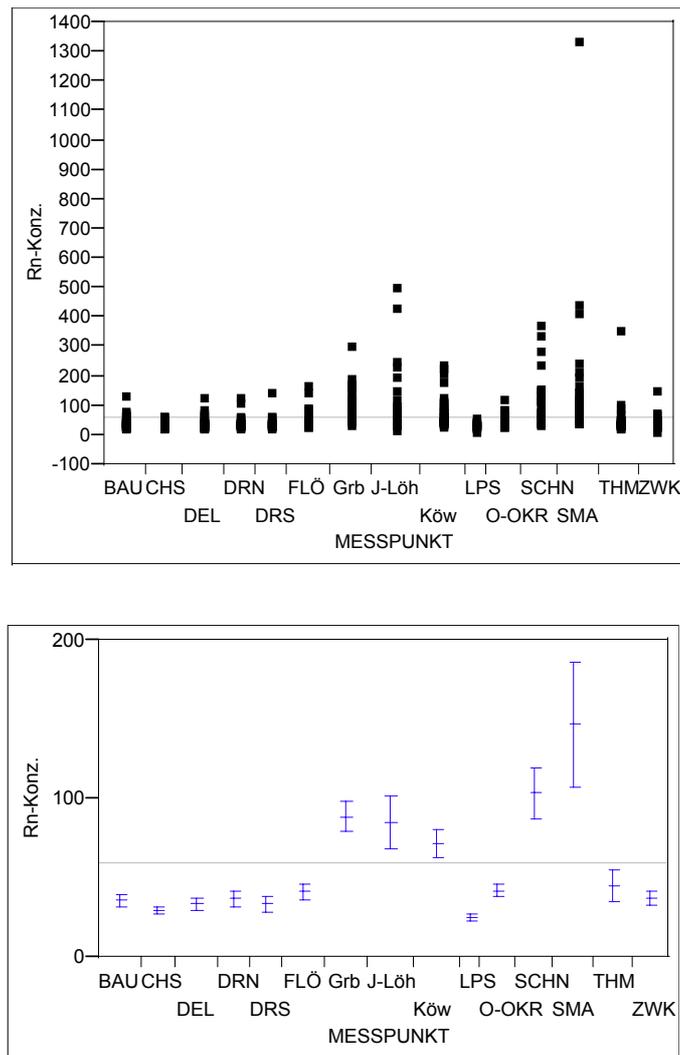


Abbildung 4: Darstellung der Radonkonzentration in Gebäuden einer Zufallstichprobe aus Sachsen. Darstellung der Einzelwerte oben und Mittelwerte mit Standardfehler unten. Zwischen den Gemeinden bestehen signifikante Unterschiede in der Radonverteilung, wobei die Gemeinden oberhalb der quer verlaufenden Referenzlinie in den Gebieten mit erhöhter Radonbelastung liegen. (ANOVA, $p < 0,001$); Rn-Konz. [Bq/m³].

Übereinstimmende Ergebnisse mit denen bei Frauen, wurden auch bei Männern gefunden. Eine Diskussion dieser Diskrepanzen ist interessant, würde aber an dieser Stelle den Rahmen sprengen.

Im Vergleich zu den hier berichteten Radonmesswerten aus den Jahren 1991/92 in den Radon belasteten Regionen Sachsens, wurden 1996 wesentlich höhere Werte gemessen. Der Medianwert in dieser Stichprobe betrug 300 Bq/m³ und der Anteil der Häuser mit einer Radonkonzentration > 250 bzw. > 1000 Bq/m³ machte 65% bzw. 13% der Gebäude aus (5). Mögliche Ursachen für diese Diskrepanz können Unterschiede in der Methodik der Stichprobenbildung sein aber auch ein echter Anstieg der Radonkonzentration im Ergebnis von baulichen Veränderungen der Gebäude, um Heizenergie einzusparen. Dieser Effekt wird in der internationalen Literatur schon lange beschrieben.

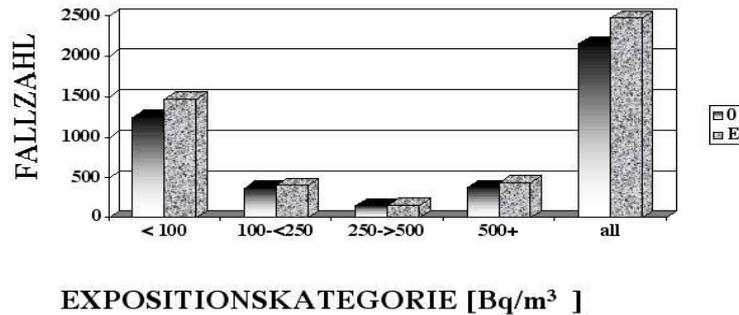


Abbildung 5: Vergleich der tatsächlich im Zeitraum von 1961-1989 in den nach Radonexpositionsclassen analysierten Gemeinden (n =160) aufgetretenen weiblichen Lungenkrebsfälle(O) mit der Zahl der Fälle, die aufgrund der in den einzelnen Gemeinden vorhandenen Bevölkerungszahl und Altersverteilung normal zu erwarten waren (E);Standardisiert auf die sächsische Bevölkerung und Gemeindegrößenklassen. Die tatsächlich beobachtete Fallzahl ist durchgängig niedriger als die Anzahl der Fälle, die normalerweise auftreten müssten.

4. Energiesparmaßnahmen an Gebäuden als Ursache für Veränderungen der Radonkonzentration

4.1. Problembeschreibung

In der internationalen Literatur wird beschrieben, dass im Ergebnis einer energieeffizienten Bauweise erhöhte Radonkonzentrationen in diesen Gebäuden auftreten. Im Vergleich zu Häusern in konventioneller Bauweise kann der Unterschied das 3-10-fache betragen (6, 7, 8, 9, 10), (Abbildung 6).

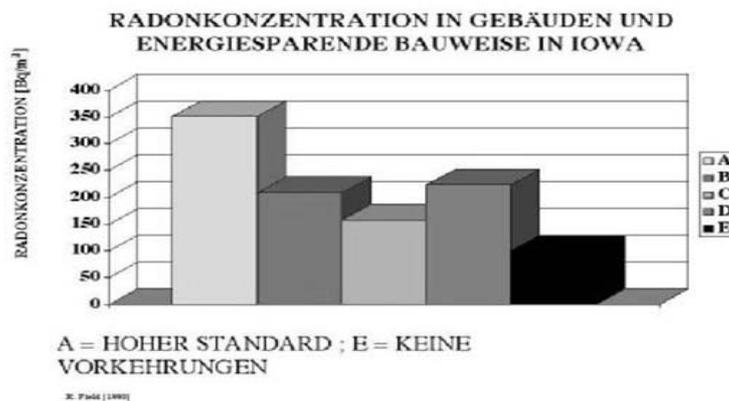


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen energiesparender Bauweise und Radonkonzentration in Gebäuden nach (6)

Neben einer energieeffizienten Bauweise, wird die Radonkonzentration in einem Gebäude auch von anderen Faktoren ungünstig beeinflusst:

- Einfamilienhäuser im Vergleich zu Mehrfamilienhäusern;
- bei fehlender und insbesondere bei nur teilweiser Unterkellerung;
- bei nicht betonierten Kellerböden aus Naturstein oder Lehm;
- bei hoher Radon Exhalation aus dem Baugrund (Bodenpermeabilität);
- Erdgeschossdecken mit schlechter Isolierung zum Keller bzw. Baugrund;
- Abdichtung und Einschränkung des Luftaustausches, z.B. durch Einbau neuer Fenster;
- Kellerzugang im Haus;
- Feuerstätten im Erdgeschoss;
- seltenes Lüften;
- energieeffiziente Bauweise.

Der Betrieb einer mit Öl oder Gas betriebenen Zentralheizung, eine Wärmerückgewinnungsanlage bzw. einer Klimaanlage, führen dagegen in den meisten Fällen zu einem Abfall der Radonkonzentration im betreffenden Gebäude. Die Betonierung des Kellerbodens wirkt einer durch Abdichtung des Gebäudes verursachten Zunahme der Radonexposition entgegen. Die Art der Veränderung der Radonkonzentration in einem Gebäude nach baulichen Veränderungen steht also offensichtlich in einem komplexen Zusammenhang mit Art und Umfang der baulichen Veränderungen selbst. Dabei kann die Radonkonzentration ansteigen, unverändert bleiben oder sogar abfallen.

Verschiedene Autoren berichten über eine hohe Variabilität der Radonkonzentration zwischen einzelnen Gebäuden, die z.B. bei energieeffizienten Häusern bis zum Faktor 8 betragen kann und nicht mit Unterschieden in der Luftaustauschrate korreliert. Dieser Zusammenhang ist nur nachweisbar, wenn die Rate des Radoneintritts in die Gebäude vergleichbar ist (11),(12). In einer komplexen und teilweise stratifizierten Analyse zur Kontrolle von Confounder Effekten unter Einbeziehung geologischer und verschiedener Hausparameter, wurden Ursachen für die Variabilität der Radonkonzentration in Gebäuden anhand des Ist-Zustandes dieser Gebäude analysiert. Im Ergebnis der Analyse wurde festgestellt, dass nur ca. 5% der o.g. Variabilität der Radonkonzentration durch geologische Faktoren zu erklären sind. Werden die Variablen, welche die Hauseigenschaften beschreiben, in diese Analyse einbezogen, steigt der Anteil der erklärten Variabilität auf ca.15-18 % (13). In einer vergleichbaren Studie wird dieser Anteil mit 22% angegeben (14). In der Konsequenz bedeutet dies, dass die wesentlichsten Ursachen für die Variabilität der Radonkonzentrationen in Gebäuden nicht bekannt sind.

Die in der Literatur beschriebenen Effekte wurden auch in eigenen Untersuchungen an einer Hausstichprobe nachgewiesen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich der Radonmesswerte in einer Hausstichprobe aus 1991 zu 1996/98

	VORHER	NACHHER	FAKTOR
	67	280	4,20
	392	530	1,35
	230	194	0,84
	194	675	3,50
	119	440	3,70
	1171	5600	4,80
MITTELWERT			3,05

Im Vergleich zum Ausgangswert 1991, war die Radonkonzentration in den gleichen Häusern 1996-1998 nach baulichen Veränderungen durchschnittlich um den Faktor 3 angestiegen. Dabei ist sie in einzelnen Häusern, trotz baulicher Veränderungen zur Energieeinsparung, nur geringfügig angestiegen oder sogar etwas gefallen. Ausgehend von den vorliegenden Erfahrungen kann davon ausgegangen werden, dass technische Einbauten mit dem Ziel der Energieeinsparung in Gebäuden in der Regel zu einer signifikanten Erhöhung der Radonexposition führen. Betroffen sind sowohl Bewohner in bestehenden Gebäuden, in denen die Luftwechselzahl durch bauliche Veränderungen signifikant gesenkt wurde, als auch Bewohner von Neubauten, die durch intensive Dämmung Niedrigenergie-Standards erfüllen. Das gilt auch für öffentliche Gebäude und Arbeitsplätze. Fallende oder nur sehr moderat erhöhte Radonkonzentrationen nach gleichen Rekonstruktionsmaßnahmen deuten aber andererseits darauf hin, dass diese Entwicklung vermeidbar ist. Es geht also um die Frage, wie inakzeptable Strahlenexpositionen infolge von baulichen Rekonstruktionsmaßnahmen zur Energieeinsparung an Gebäuden vermieden oder zumindest auf einem akzeptablen Niveau gehalten werden können. Dieses Problem ist in Deutschland bisher wenig beachtet worden. Auch in der EnEV 2002 wird diese Problematik nicht behandelt und ist damit bisher auch nicht Bestandteil der Beratertätigkeit von Energieberatern, die Bauherren bei der Umsetzung der Bestimmungen zur Gewährleistung einer hohen Energieeffizienz neuer bzw. rekonstruierter Bauwerke beraten. Bundesweit sind mittlerweile mehrere Tausend Energieberater tätig. Auch den zuständigen Handwerks- und Architektenkammern ist die Problematik nicht bekannt. Vor dem Hintergrund der bis Ende 2005 umzusetzende „RICHTLINIE 2002/91/EG“ über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ sowie der in 2005 zu erwartenden neuen Gesetzgebung hinsichtlich der Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung beim Aufenthalt in Gebäuden ist hier eine Entwicklung im Gange, die ein erhebliches Konfliktpotential besitzt.

4.2. Ergebnisse von Modellstudien

Vor diesem Hintergrund wurde mit Unterstützung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) ein Forschungsprojekt durchgeführt (15).

Die wesentlichste Zielstellung des Projektes besteht in der Entwicklung und Validierung von Verfahren, die es gestatten, im Vorfeld geplanter Rekonstruktionsmaßnahmen, z.B. bei der Umsetzung der Vorschriften der Energieeinsparverordnung EnEV 2002, den zu erwartenden Effekt auf die Radonkonzentration abzuschätzen.

Es sollten die wesentlichsten Gebäude bezogenen Faktoren identifiziert werden, die für die drei möglichen Sanierungseffekte (Anstieg, Abfall oder Konstanz der Radonkonzentration) verantwortlich sind. Dadurch soll einem inakzeptablen Anstieg der Radonkonzentration in Folge von Energie-sparmaßnahmen an Gebäuden vorgebeugt und ggf. auch eine Absenkung nach abgeschlossener Sanierung ermöglicht werden. Die methodische Vorgehensweise bestand im Unterschied zu den bisherigen Verfahrensweisen, in der Messung der Radonkonzentration vor und nach Umbau-maßnahmen im gleichen Gebäude und Modellierung der Effekte unter Einbeziehung der durch Befragungen erhobenen baulichen Veränderungen durch ein Regressionsmodell. Dieses Modell gestattet die gleichzeitige Analyse metrischer, ordinaler und kategorialer Daten. Das Regressionsmodell hat die Form:

$$\text{RADONKONZ.}_{\text{(aktuell)}} = a \cdot (\text{RADONKONZ.}_{\text{(vorher)}}) + \text{Faktoren}$$

Die in diesem Modell enthaltenen Faktoren, die mit unterschiedlichen Gewicht und Vorzeichen in die Gleichung eingehen, werden dabei aus den einzelnen Baumaßnahmen abgeleitet. Die Auswertung der Daten ergab, dass die 2002 gemessene Radonkonzentration sich von der 1991/92 in den gleichen Wohnungen mittels Kernspurdetektoren während eines Jahres gemessenen, deutlich unterscheidet. Bei ca. 23 % der Wohnungen hatte sich die Radonkonzentration nicht verändert. In ca. 27 % der Fälle war sie im Vergleich zum Vorwert deutlich gefallen und in ca. 50% der Wohnungen war sie teilweise erheblich angestiegen (Abbildung 7). Im Ergebnis der Regressionsanalyse wurde der Nachweis geführt, dass unter den gegebenen Bedingungen zwischen den baulichen Veränderungen und der sich einstellenden Radonkonzentration nach Beendigung der Baumaßnahmen ein signifikanter Zusammenhang besteht. (Abbildung 8)

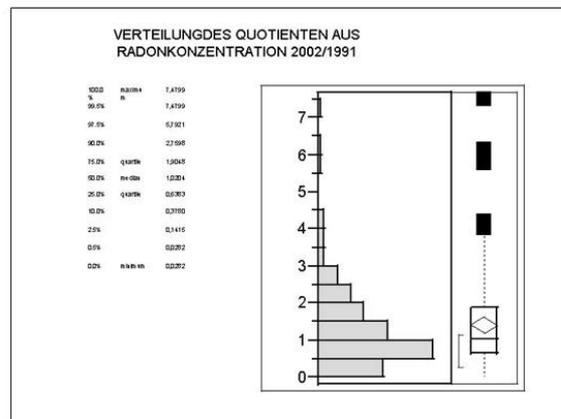


Abbildung 7: Verteilung des Quotienten aus der 2002 gemessenen Radonkonzentration zu der aus 1991/1992, (n= 98)

Die Regressionsanalysen wurden mittels verschiedener Datensätze, mit Vormesswerten aus verschiedenen Zeitperioden (1991/92, 1996/98) und retrospektiv durch Glasmessungen ermittelten Werten sowie mit Kombinationen dieser Daten durchgeführt. In jedem Fall wurden signifikante Anpassungen mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 0,7 bis 0,9 gefunden.

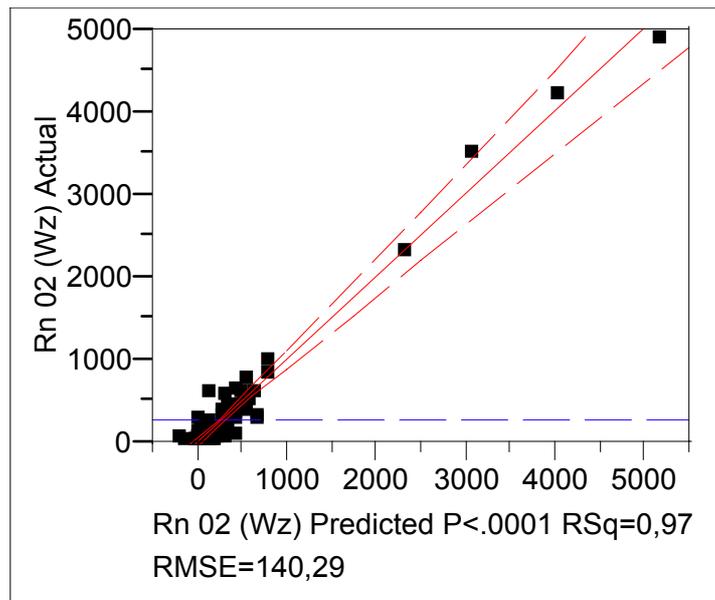


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen gemessenen Radonwerten 2002 und der durch das Regressionsmodell mit den Vorwerten aus 1998 berechneten Radonkonzentration, wobei zwischen den Vorwerten und den 2002 gemessenen Werten ein ansonsten signifikanter Unterschied besteht. (n= 133)

Die Radonkonzentration in Häusern, die keinerlei Veränderungen erfahren haben unterscheidet sich über den Beobachtungszeitraum hingegen nicht. Im Ergebnis der Studie wurde außerdem prinzipiell gezeigt, dass auch die anhand von retrospektiven Methoden (Glasmessungen) ermittelten „Vorwerte“ der Radonkonzentration für derartige Analysen nutzbar sind. Damit wurde nachgewiesen, dass unter den gewählten Untersuchungsbedingungen Veränderungen der Radonkonzentration mit baulichen Veränderungen der Gebäude im Zusammenhang stehen und mit deren Hilfe auch geschätzt werden können.

Zusammenfassung

1. Nur unter der Voraussetzung, dass die aus den bisherigen Bevölkerungsstudien abgeleiteten Risikokoeffizienten für das Lungenkrebsrisiko durch die häusliche Radonexposition zutreffend sind, würde schon immer für einen großen Teil der sächsischen Bevölkerung in den Radon belasteten Gebieten ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko bestehen.
2. Bauliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden könnten dann zu einer erheblichen Zunahme der Radonbelastung etwaiger Nutzer und damit ihres Erkrankungsrisikos für Lungenkrebs, insbesondere in den Gebieten mit erhöhter Radonexposition der Bewohner, führen.
3. Aus diesem Grund sollte bereits während der Planung, Durchführung und nach Fertigstellung von Rekonstruktionsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden zur Energieeinsparung oder bei energieeffizienter Bauweise neuer Gebäude, dieses mögliche Radonproblem beachtet werden.
4. Angesichts der Expositionssituation in den Gebieten mit hoher Radonbelastung sollte die messtechnische Erfassung der Radonkonzentration und ihrer Veränderung in die Planungen integriert werden.
5. Das vorliegende Prognosemodell, obwohl durchaus noch ausbaufähig, kann einen Beitrag dazu leisten, bereits bei der Planung von Baumaßnahmen die zu erwartende Veränderung der Radonexposition einzuschätzen und ggf. Anpassungen vorzunehmen.

Literatur

1. Tirmarche, M., D.Laurier, et al. (2002). „Lung cancer risk associated with low chronic radon exposure: results from the French Uranium miners cohort and the European projekt.“ T-17-4, P-2a-56.
2. Krewski, D., J.H.Lubin, et al. (2005). „Residential radon and risk of lung cancer“ Epidemiology 16(1): 137-145
3. Darby, S., D. Hill, et al. (2004). „Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case control studies“ BMJ,doi:10.1136/bmj.38308.477650.63(published 21 December 2004)
4. Pavia, M., A. Bianco, et al. (2003). „Meta-analysis of residential exposure to radon gas and lung cancer“ Bull World Health Organ. 81(10): 732-738. Epub 2003 Nov. 25
5. Schneider, L., F.Haufe, F. Philipps (1997). „Radon als Teil der natürlichen Radioaktivität in Sachsen- Methodik zum Nachweis von Radon in der Atemluft“
Stoller Ingenieurtechnik GmbH Dresden
6. Field, R.W., B.C.Kross, et al. (1993). „Factors associated with elevated 222Rn levels in Iowa.“ Health Physics 65(2): 178-84.
7. Budnitz, R.J. (1974). „Radon-222 and its daughters-a review of instrumentation for occupational and environmental monitoring.“ Health Physics 26(2): 145-63
8. Fleischer, R.L., A. Mogro_Campero, et al. (1983). „Indoor radon levels in the north-eastern U.S.: effects of energy-efficiency in homes.“ Health Physics 45(2): 407-412.
9. Nero, A.V., M.L.Boegel, et al. (1983). „Radon concentrations and infiltration rates measured in conventional and energy-efficient houses.“ Health Physics 45(2): 401-405.
10. Hess, C.T., R.L. Fleischer, L.G. Tuner (1985). „Field and laboratory tests of etched track detectors for 222 Rn: summer-vs-winter variations and tightness effects in Main houses.“ Health Physics 49(1): 56-79
11. Nero, A.V., M.L.Boegel, et al. (1983). „Radon concentrations and infiltration rates measured in conventional and energy-efficient houses.“ Health Physics 45(2): 401-5.
12. Mc Gregor, R.G., W.B.Walker, E.G.Letournau (1985). „Radon and radon daughters in energy efficient housing.“ The Science of the Total Environment 45: 271-278
13. Lévesque, B., D.Gauvin, et al. (1997). „Radon in residences: influence of geological and housing characteristics“ Health Phys 72(6): 907-914
14. Gunby, J.A., S.C.Darby, et al. (1993). „Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom.“ Health Physics 64(1): 2-12.
15. Conrady, J., A.Guhr, B.Leißring, M.Nagel (2004). „Modelllösung für die Vermeidung erhöhter Werte von Wohnungsradon durch bauliche Energiesparmaßnahmen“
AZ: 17349 Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Abschlussbericht

Referentenverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
und Vorstandsvorsitzender KORA e.V.
D-01069 Dresden, Friedrich-List-Platz 1
Telefon: 0351 / 462 - 2440
Telefax: 0351 / 462 - 2172
www.bau.htw-dresden.de/index.htm?bcm
email: dresden@koraev.de

Prof. Dr.-Ing. Hannes Neumann

Rektor der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
D-01069 Dresden, Friedrich-List-Platz 1
Telefon: 0351 / 462 - 31 01
Telefax: 0351 / 462 - 21 85
www.htw-dresden.de/hs/rektorat.html
email: rektor@htw-dresden.de

Dr. Albrecht Buttolo

Staatssekretär für Landesentwicklung, Städtebau und Wohnungswesen
Sächsisches Staatsministerium des Innern
D-01097 Dresden, Wilhelm-Buck-Straße 4
Telefon: 0351 / 564 3021
Telefax: 0351 / 564 3028
www.sachsen.de/de/bf/staatsregierung/ministerien/smi/smi/index.html
email: Heike.Poldrack@smi.sachsen.de (Büro Staatssekretär)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Leißring

Bergtechnisches Ingenieurbüro Geoprax
D-09114 Chemnitz, Max-Planck-Str. 18
Telefon: 0371 / 336 - 2788
Telefax: 0371 / 336 - 2789
www.geoprax-leissring.de
email: chemnitz@geoprax-leissring.de

Dr. rer. nat. Walfried Löbner

WISMUT GmbH
Abteilung Umwelt Überwachung Strahlenschutz
D-09117 Chemnitz, Jagdschänkenstraße 29
Telefon: 0371 / 8120 - 127
Telefax: 0371 / 8120 - 107
www.wismut.de
eMail: w.loebner@wismut.de

Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz

IAF Radioökologie GmbH (Geschäftsführer)
D-01326 Dresden, Karpatenstraße 20
Telefon: 0351 / 263 30 - 12
Telefax: 0351 / 263 30 - 22
www.iaf-dresden.de
email: info@iaf-dresden.de

Dr. rer. nat. Andreas Guhr

ALTRAC Radon-Messtechnik
D-12524 Berlin, Dorothea-Viehmann-Straße 28
Telefon: 030 / 679 897 37
Telefax: 030 / 678 018 86
www.altrac.de
email: Guhr.ALTRAC@t-online.de

Dr. rer. nat. Eckard Ettenhuber

Bundesamt für Strahlenschutz
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Abteilung natürliche Radioaktivität
D-38201 Salzgitter, Postfach 10 01 49
Telefon: 01888 333 4200
Telefax: 01888 333 4205
www.bfs.de
email: eettenhuber@bfs.de

Dipl.-Geophys. Rainer Lehmann

Bundesamt für Strahlenschutz
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Fachgebiet Radon
D-38201 Salzgitter, Postfach 10 01 49
Telefon: 01888 333 4220
Telefax: 01888 333 4205
www.bfs.de
email: rlehmann@bfs.de

Dr. rer. nat. Jürgen Conrady

PreCura Institut für Präventive Medizin e.V. (Vorsitzender)
D-12623 Berlin, Kastanienallee 6a
Telefon: 030 / 927 996 34
Telefax: 03772 / 329 539
www.precura.de
email: precura-conrady@t-online.de



Herausgeber KORA e.V.
Kompetenzzentrum für Forschung und Entwicklung zum radonsicheren Bauen und Sanieren
c/o HTW Dresden (FH), Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
Telefon: 0351/4622400, Telefax: 0351/4622172
www.koraev.de, email: dresden@koraev.de

Dresden 2005

redaktionelle Bearbeitung: Dipl.-Ing. Ralf Groh

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.
Ohne ausdrückliche Genehmigung von KORA e.V. ist es nicht gestattet, dieses Werk
oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen
sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen vorzunehmen.
Zahlenangaben ohne Gewähr.

Für die Inhalte sind die jeweiligen Verfasser verantwortlich.

Druck und Bindung:
HTW Dresden (FH), Bereich Druck und Foto