# INSTITUT FÜR KERNPHYSIK

**benannt nach Henryk Niewodniczański**

ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Krakau, Polen



www.ifj.edu.pl/reports/2003.html

Krakau, März 2003


---

**Bericht Nr. 1920/AP**

## KALIBRIERKAMMERN FÜR RADON
## am Institut für Kernphysik benannt nach Henryk Niewodniczański


K. Kozak, M. Janik, J. Mazur, E. Kochowska,
J. Bogacz, J. Łoskiewicz, J. Swakoń, T. Zdziarski, R. Haber



**Zusammenfassung**

In diesem Bericht wird das Labor zur Kalibrierung von Radon-Detektoren vorgestellt. Das Labor ist mit zwei Kalibrierkammern (Volumen: 200 und 600 Liter), zwei Radonquellen (Ra-226-Aktivität: 21,6 kBq und 52,3 kBq), einer Pumpe, einem Durchflussmesser, einem Manometer usw. ausgestattet. Der erreichbare Bereich der Radonkonzentrationen liegt zwischen 35 kBq/m³ und 244 kBq/m³. Eine Computersoftware wurde zur Planung und Steuerung des Kalibrierverfahrens entwickelt.



Diese Arbeit wurde teilweise durch das Forschungsprojekt Nr. 6 PO4D 026 19

des Polnischen Komitees für Wissenschaftliche Forschung unterstützt.

**Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wird das im Labor für natürliche Radioaktivität (Abteilung für Umweltphysik und Strahlenübertragung NZ6, IFJ) eingerichtete Labor „Radonkammern“ zur Kalibrierung von Radondetektoren vorgestellt. Das Labor „Radonkammern“ ist mit zwei Kalibrierkammern mit einem Volumen von 200 und 600 Litern, zwei Radonquellen (Ra-226-Aktivität: 21,6 kBq und 52,3 kBq), Pumpen, Durchflussmessern, Manometern usw. ausgestattet. Es wird die Software „KOMORY v.1.3“ vorgestellt, die zur Planung des Kalibrierprozesses und zur Überwachung der Betriebsparameter der Kammern verwendet wird.

## 1. Einleitung

Radonkonzentrationsmessungen in der Luft werden durchgeführt, um das Ausmaß der radiologischen Exposition durch dieses Isotop zu bestimmen. Zur Messung der Radonkonzentration werden zwei Arten von Detektoren verwendet – passive und aktive Detektoren.

Aktive Detektoren ermöglichen eine direkte und kontinuierliche Messung der Radonkonzentration, während passive Detektoren Informationen über die durchschnittliche Radonkonzentration während der Expositionszeit liefern.

Die Messung mit passiven Detektoren erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Phase wird der Detektor für eine genau definierte Zeit (sog. Expositionszeit) in dem Volumen exponiert, in dem die Radonkonzentration bestimmt werden soll. Nach Ende der Exposition erfolgt das sogenannte „Ablesen des Detektors“ – meist in einem spezialisierten Labor. Auf Basis der beim Ablesen erzielten Ergebnisse wird die durchschnittliche Radonkonzentration während der Exposition berechnet.

Passive Detektoren lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen. Die erste Gruppe sind Spurendetektoren, die das Entstehen von Strahlungsschäden in Materialien (meist Kunststoff) durch den Alphazerfall von Radon nutzen. Der Spurendetektor ist in einem Gehäuse untergebracht, das das Eindringen von Radon erlaubt und gleichzeitig das empfindliche Material schützt. Das Ablesen erfolgt durch chemische Behandlung und Zählung der Spuren, deren Dichte proportional zur Exposition ist. Als Spurendetektoren werden hauptsächlich Kunststoffe wie CR-39 und LR115 [1] verwendet.

Die zweite Gruppe passiver Detektoren nutzt Adsorption und Speicherung der kurzlebigen Zerfallsprodukte von Radon. Hierbei werden Aktivkohlen eingesetzt, die sehr gute Adsorptionseigenschaften haben. Diese Detektoren werden im Labor zur Messung der Radonkonzentration in Gebäuden und der Radonexhalation aus dem Boden verwendet. Die Aktivkohle wird in einem speziell konstruierten Aluminiumbehälter platziert, der eine freie Luftzirkulation ermöglicht. Nach der Exposition wird der Behälter luftdicht

verschlossen. Das „Ablesen“ erfolgt durch spektrometrische Erfassung der Gammaquanten, die von kurzlebigen Zerfallsprodukten des Radons emittiert werden. Die Analyse des Spektrums ermöglicht die Berechnung der mittleren Radonkonzentration während der Exposition [2].

Die im Labor verwendeten aktiven Detektoren sind Ionisationskammern (AlphaGUARD PQ 2000 und PQ2000PRO), die direkt die von Radon ausgesandte Alphastrahlung erfassen. Sie können im Diffusions- oder im Durchflussmodus betrieben werden. Im Diffusionsmodus gelangt Radon durch einen Filter in die Messkammer, der Zerfallsprodukte effizient zurückhält. Im Durchflussmodus wird Radon mit Luft über eine Pumpe eingesaugt [3].

Die Kalibrierkammern mit Zubehör sind das wichtigste Instrument zur kontrollierten Exposition von Detektoren gegenüber Radon. Sie ermöglichen die Entwicklung neuer Detektionstechniken und die Kalibrierung von Dosimetrietechnik. Passive Detektoren müssen zuvor kalibriert werden, d. h. ihre Reaktion auf eine bekannte Radonkonzentration muss bestimmt werden. Dafür dienen Kalibriereinrichtungen, die eine kontrollierte Konzentrationserzeugung und deren Überwachung ermöglichen. Das Grundsystem besteht aus einer Radonquelle und einer Kalibrierkammer. Das Labor verfügt über zwei Radonquellen (Typ RN-1025, PYLON, Kanada) und zwei eigens entworfene Kalibrierkammern.

## 2. Kalibrierkammer IFJ-KR-200

Abbildung 1 zeigt die Kammer IFJ-KR-200. Die Kammer besteht aus einem vertikal stehenden Stahlzylinder mit einer Wandstärke von 1,5 mm. Die Höhe beträgt 0,83 m, der Durchmesser 0,56 m, das Volumen 211,0 ± 2,4 dm³. Die Dichtung erfolgte durch Löten von Deckel und Boden. Der Deckel (mit Silikon abgedichtet) wird mit 12 Schrauben verschlossen, die mit einem Drehmomentschlüssel angezogen werden.

Abb. 1. Kalibrierkammer für Radon IFJ-KR-200.

Die installierten Anschlüsse, die mit Gashähnen ausgestattet sind, ermöglichen das Umwälzen der Luft in einem geschlossenen Kreislauf durch die Radonquelle in das Innere der Kammer sowie das Lüften der Kammer vor und nach dem Experiment. In den Deckel der Kammer ist ein Druckmanometer eingebaut, das die Kontrolle der Dichtigkeit ermöglicht. Der Anschluss an die Steuertafel erfolgt über PVC-Schläuche.

## 3. Kalibrierkammer für Radon IFJ-KR-600

Eine Gesamtansicht der Kammer IFJ-KR-600 zeigt Abb. 2.

Abb. 2. Kalibrierkammer für Radon IFJ-KR-600.

Die Kammer IFJ-KR-600 hat ein Volumen von 608,0 ± 2,4 dm³. Ihre Abmessungen sind: Länge 2,2 m, Durchmesser 0,6 m. Sie besteht aus 3 mm dickem Stahlblech. Ein Konstruktionsschema der Kammer ist in Abb. 3 dargestellt. Der Hauptteil der Kammer ist ein Stahlzylinder, der mit einem Deckel, der mit 6 Schrauben befestigt wird, hermetisch verschlossen werden kann. Die Schrauben werden mit einem Drehmomentschlüssel angezogen, um eine zuverlässige Abdichtung zu gewährleisten.

Die Kammer ist mit sieben Ventilen ausgestattet. Sie ermöglichen die Befüllung der Kammer mit Radon aus Quellen, die an der Steuertafel montiert sind, das Lüften vor und nach der Exposition sowie den Anschluss von Messgeräten (z. B. AlphaGUARD) zur Kontrolle der Bedingungen im Inneren der Kammer. Die Kammer verfügt über eine elektrische Installation (12 V und 220 V), die die Stromversorgung der in der Kammer platzierten Geräte erlaubt. Drei Paare von elektrischen Klemmen (vakuumdicht) führen nach außen und ermöglichen die Steuerung dieser Geräte.

Im Inneren der Kammer ist ein Ventilator installiert, der für die Luftzirkulation und eine gleichmäßige Verteilung der Radonkonzentration im gesamten Kammerraum sorgt. Die Steuerung des Ventilators (Ein-/Ausschalten und Drehzahlregelung) erfolgt über eine externe Einheit. Die Kammer ist mit einem Regal auf Schienen ausgestattet, das die Platzierung von Detektoren oder Geräten in beliebigem Abstand innerhalb der Kammer ermöglicht. Bei Bedarf kann der Innenraum beleuchtet werden.

Die Ventile zur Verbindung der Kammer mit der Steuertafel sowie zusätzliche Anschlüsse für externe Messgeräte befinden sich im oberen Teil der Kammer, während sich das Ventil für Druckluftzufuhr (zur Lüftung der Kammer) an der Rückwand befindet (Ventil 7 – Abb. 3). Das Auslassventil (Ventil 1 – Abb. 3) ist an der Vorderseite der Kammer angebracht. Diese Anordnung der Belüftungsventile gewährleistet eine schnelle und gründliche Entfernung des Radons aus dem Kammerinnenraum. Die Druckluft wird durch einen Druckminderer zugeführt, der die Lüftungsgeschwindigkeit reguliert und mit einem Überdruckventil ausgestattet ist.

Abb. 3. Schema der Kammer IFJ-KR-600.

**Dichtigkeitsprüfung der Kammern:**
Die Kammern wurden auf ihre Dichtigkeit geprüft, indem sie mit Druckluft befüllt wurden. Der Anfangsdruck betrug 101,3 kPa. Über einen Zeitraum von 7 Tagen lagen die Druckänderungen unterhalb der Messgenauigkeit des Geräts (Klasse 1,5).

## 4. Kalibrierstation

Die Kalibrierstation für Radondetektoren befindet sich in einem Raum mit einer Fläche von ca. 15 m². In diesem Raum stehen beide Radonkammern, zwei Radonquellen, Anzeigen für Luftfeuchtigkeit, Druck und Temperatur sowie das Steuerpult für die Kammern und die zugehörige Ausrüstung (Pumpen, Netzteile, Labortische, fließendes Wasser). Das Schema der gesamten Kalibrierstation ist in Abb. 4 dargestellt.

Am Steuerpult sind zwei Radonquellen (I und II) der Firma PYLON montiert, die die Erzeugung vorgegebener Radonkonzentrationen ermöglichen. Es besteht die Möglichkeit, jede Quelle an jede Kammer anzuschließen sowie beide Quellen mit einer Kammer zu verbinden.

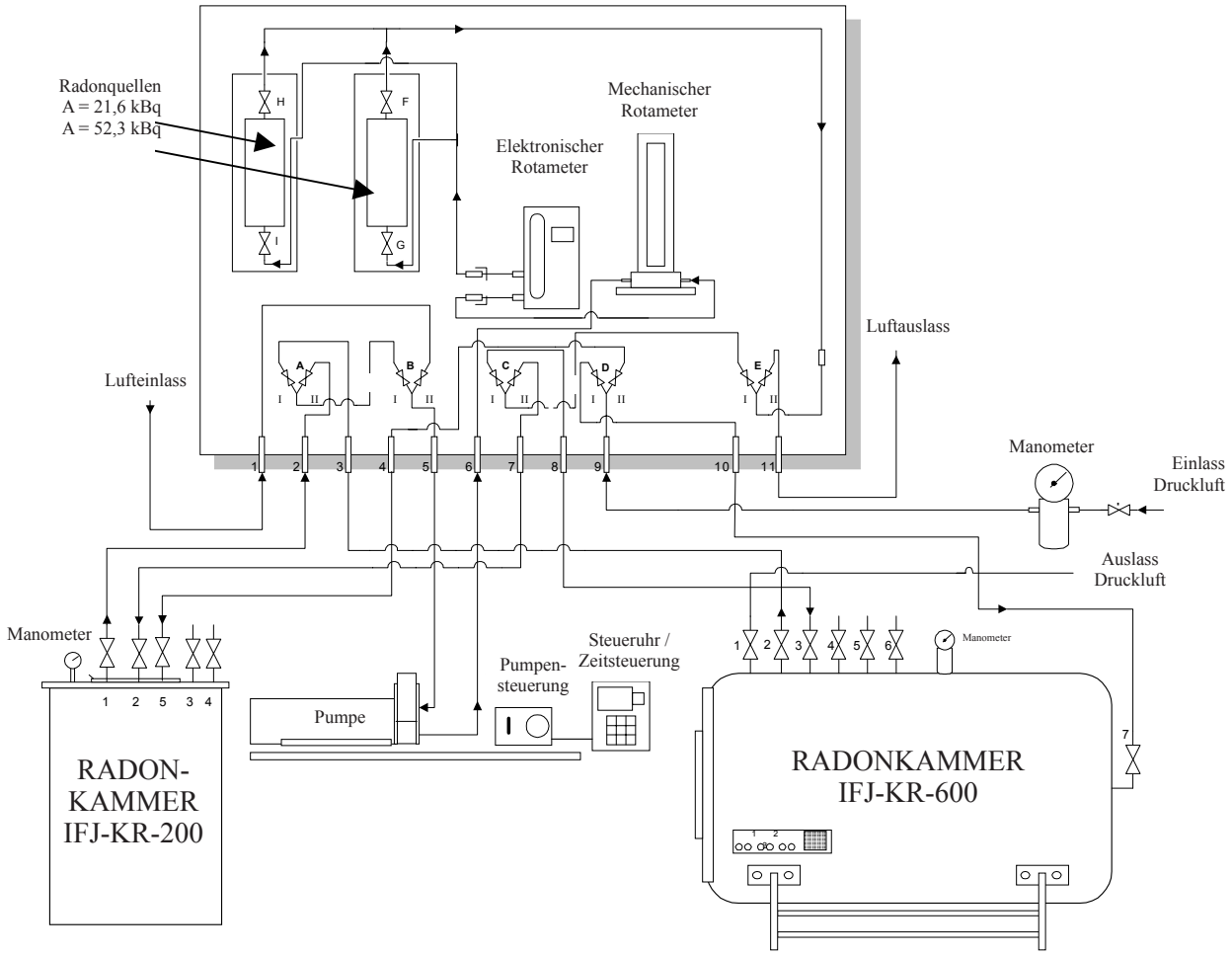



Abb. 4. Schema der Kalibrierstation.

Die Parameter der verwendeten Radonquellen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Jede Quelle verfügt über ein Kalibrierzertifikat, ausgestellt von PYLON Electronic Development Co., Ltd.

Tabelle 1. Parameter der Radonquellen von PYLON [4].

| Quellentyp | RN-1025 | RN-1025 |
|---|---|---|
| Hersteller | PYLON – Kanada | |
| Isotop | Radium (226Ra) | |
| Kalibriergenauigkeit | ± 4 % | |
| Zulässiger Durchfluss | 0–10 Liter/Minute | |
| Temperaturbereich | von -20 °C bis +40 °C | |
| Feuchtigkeitsbereich | bis zu 100 % | |
| Gewicht | 1,7 kg | |
| Aktivität | 21,6 kBq | 52,3 kBq |
| Ausbeute / Produktionsrate | 2,710 Bq/min | 6,580 Bq/min |
| Abmessungen | 457 mm × 153 mm × 102 mm | |

Die maximalen Radonkonzentrationen, die in den Kammern mit den oben genannten Quellen erreicht werden, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2. Maximale Radonkonzentrationen in den Kalibrierkammern

| KAMMER | IFJ-KR-200 | IFJ-KR-600 |
|---|---|---|
| Quelle A = 21,6 kBq | bis zu 100 kBq/m³ | bis zu 35 kBq/m³ |
| Quelle A = 52,3 kBq | bis zu 244 kBq/m³ | bis zu 85 kBq/m³ |

Zur Ausstattung der Kalibrierstation gehören außerdem zwei Rotameter: ein mechanischer und ein elektronischer.
Die Rotameter können wechselseitig in den Umlauf geschaltet werden und dienen zur Überwachung der Luftströmung durch die Radonquellen.

Weitere Komponenten der Station sind:

- MASTERFLEX-Pumpe, Modell 7591-07, mit Steuerung zur stufenlosen Regelung der Durchflussrate,
- Druckluftminderer zur Belüftung der Kammern,
- Kugelhähne zur Steuerung des Kammerbetriebs,
- Durchgangsventile zum Befüllen der Kammern,
- Ventilatoren,
- programmierbarer Zeitschalter zur Stromabschaltung.

## 5. Programm „Komora v.1.3“

Die Kalibrierstation wird durch das Programm „Komora v.1.3“ unterstützt, das als interaktive Excel-Tabelle mit Visual-Basic-Elementen erstellt wurde.
Das Programm ermöglicht die Berechnung der Betriebsparameter für beide Kammern (IFJ-KR-200 und IFJ-KR-600) unter Verwendung beider Radonquellen. Die Algorithmen zur Berechnung einzelner Größen werden in Kapitel 6 dargestellt.

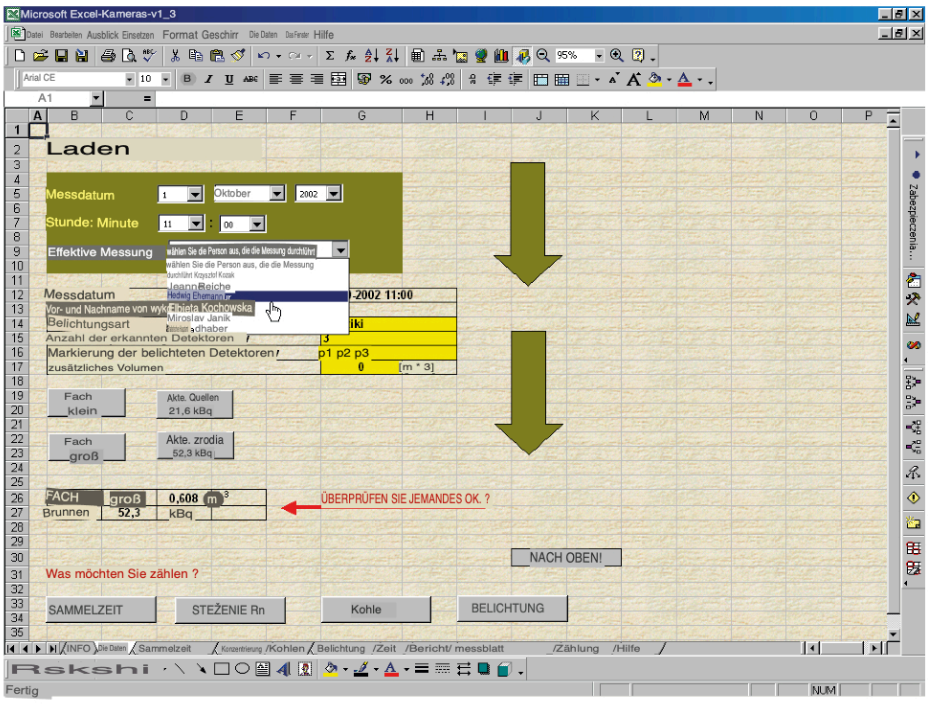



Abb. 5. Bildschirm „Daten“

Die Auswahl der Kammer und der Radonquelle erfolgt im Schritt der Dateneingabe (Bildschirm „Daten“ – Abb. 5).
Nach Angabe von Datum, Uhrzeit der Messung und der ausführenden Person kann die Kammer ausgewählt werden (Schaltflächen: „Kammer KR-IFJ-200“ oder „KR-IFJ-600“) sowie die Radonquelle (Schaltflächen: „Quelle 21,6 kBq“ oder „Quelle 52,3 kBq“).
Alle eingegebenen Informationen werden in eine Informationstabelle (gelbe Felder) eingetragen.
Zusätzlich kann das Volumen von Geräten oder Detektoren, die in die Kammer eingesetzt werden, eingetragen werden, um es in die Berechnungen einzubeziehen.
Am unteren Bildschirmrand befinden sich Schaltflächen zur Auswahl von Berechnungen:
„Sammelzeit“ – Berechnung der notwendigen Verschlusszeit der Quelle (sogenannte Sammelzeit), um die gewünschte Radonkonzentration zu erreichen;
„Radonkonzentration“ – Berechnung der erreichten Konzentration für eine vorgegebene Verschlusszeit;
„Kohlenstoff“ – Berechnung der Endkonzentration in der Kammer während der Exposition von Kohlenstoffdetektoren mit Diffusionsbarriere (3- oder 4-Tage-Detektoren);
„Exposition“ – Berechnung der Exposition [kBq•h/m³] für eine gegebene Anfangskonzentration und Expositionszeit.
Die Bildschirme der jeweiligen Programmoptionen sind in den Abbildungen 6–9 dargestellt.
Innerhalb jeder Option kann die Kammer gewechselt und eine andere Radonquelle gewählt werden.

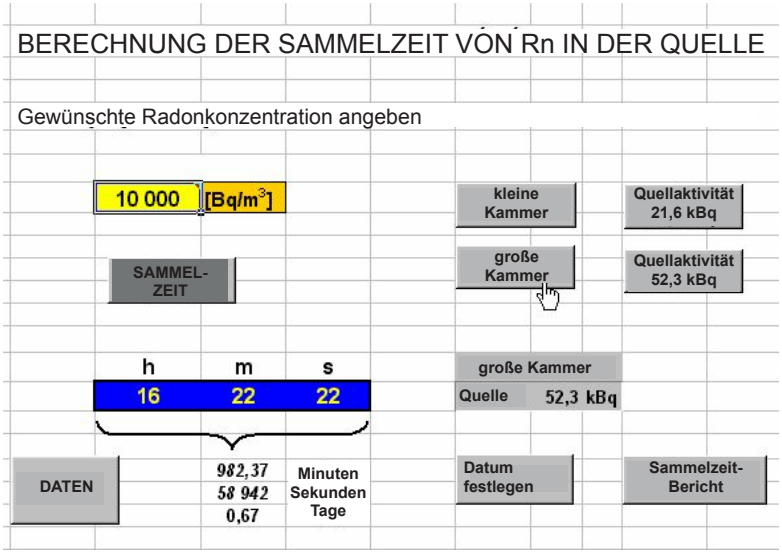



Abb. 6. Bildschirm „Sammelzeit".

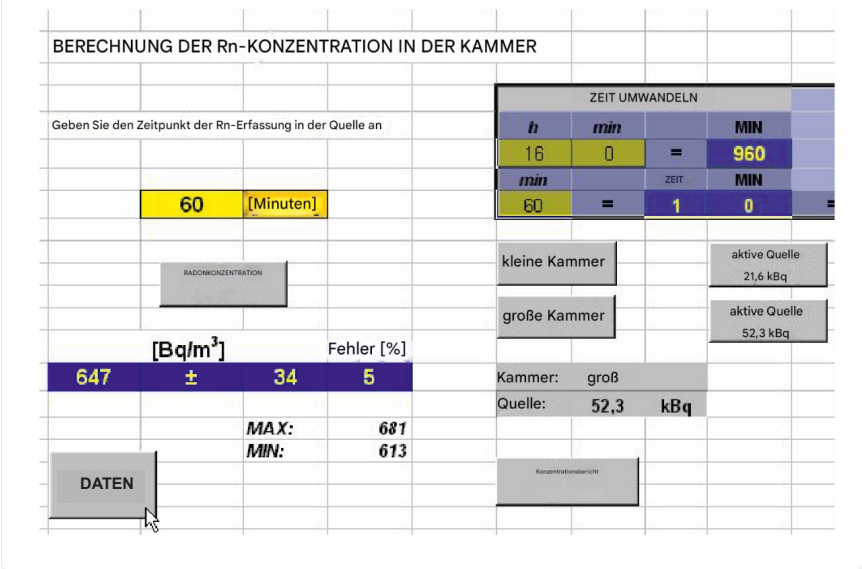



Abb. 7. Bildschirm „Radonkonzentration".

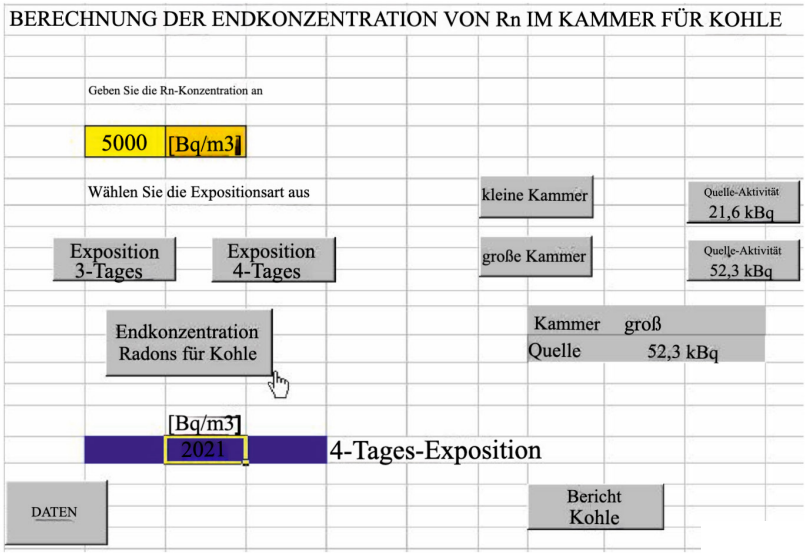



Abb. 8. Bildschirm „Kohlenstoffe".

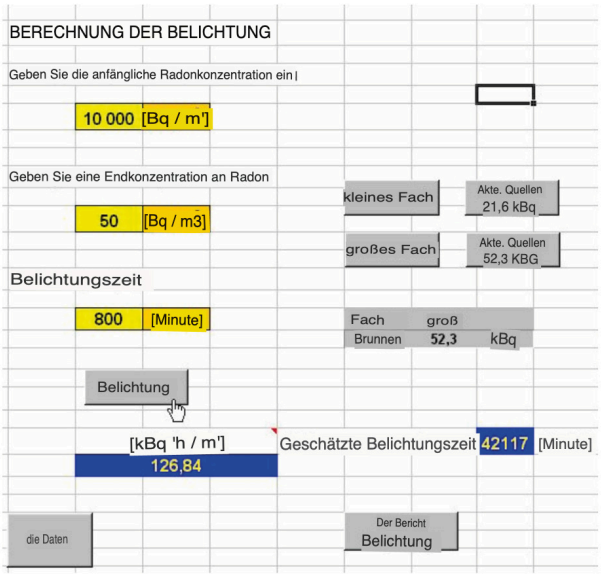



Abb. 9. Bildschirm „Exposition“

Das Programm verfügt zusätzlich über eine Funktion zur Zeitberechnung – im Arbeitsblatt „Zeiten“.
Es besteht die Möglichkeit, auf Grundlage einer angegebenen „Sammelzeit“ den Tag und die Uhrzeit des Beginns oder Endes der Quellenschließung zu berechnen.
Das Programm gibt Datum, Wochentag, Stunde und Minute für den Beginn oder das Ende der Arbeit mit der Radonquelle an.
Dies ist eine große Erleichterung bei der Planung von Messungen mit Radonkammern.
Diese Option des Programms ermöglicht auch eine bequeme Umrechnung von Zeiteinheiten, z. B. Tage in Minuten, Stunden in Sekunden usw.
Ein Ausschnitt des Arbeitsblatts „Zeiten“ ist in Abb. 10 dargestellt.

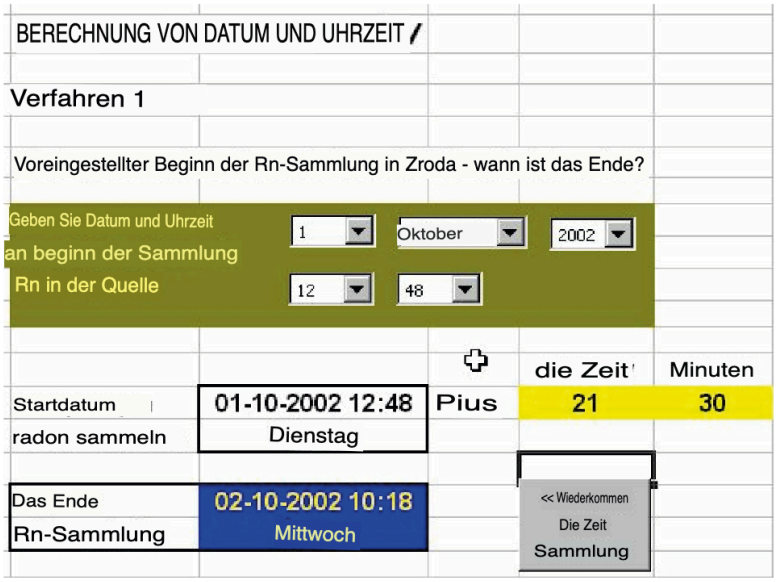
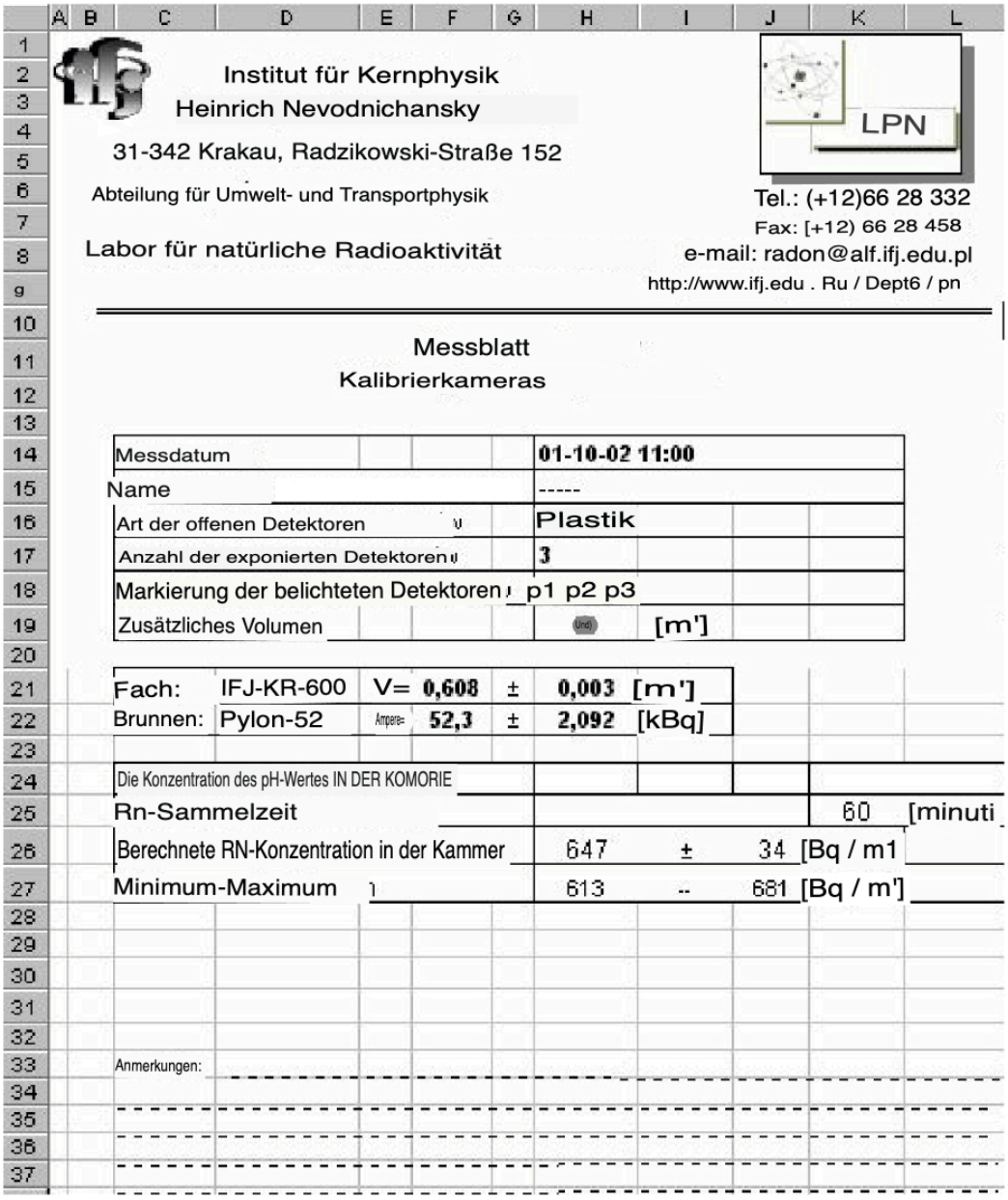



Abb. 10. Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt „Zeiten“

Die durchgeführten Berechnungen werden automatisch im „Messblatt“ gespeichert, das gemeinsam mit den zugehörigen Verfahrensdaten erstellt wird.
Ein Beispiel eines Messblatts mit einem Bericht zur Berechnung der Radonkonzentration in der Kammer ist in Abb. 11 dargestellt.



Institut für Kernphysik
Heinrich Nevodnichansky
31-342 Krakau, Radzikowski-Straße 152
Abteilung für Umwelt- und Transportphysik
Labor für natürliche Radioaktivität

LPN

Tel.: (+12)66 28 332
Fax: [+12) 66 28 458
e-mail: radon@alf.ifj.edu.pl
http://www.ifj.edu . Ru / Dept6 / pn

Messblatt
Kalibrierkameras

| | |
|---|---|
| Messdatum | 01-10-02 11:00 |
| Name | ----- |
| Art der offenen Detektoren | Plastik |
| Anzahl der exponierten Detektoren | 3 |
| Markierung der belichteten Detektoren | p1 p2 p3 |
| Zusätzliches Volumen | [m'] |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fach: | IFJ-KR-600 | V= | 0,608 | ± | 0,003 | [m'] |
| Brunnen: | Pylon-52 | Ampere= | 52,3 | ± | 2,092 | [kBq] |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Die Konzentration des pH-Wertes IN DER KOMORIE | | | | |
| Rn-Sammelzeit | | | 60 | [minuti |
| Berechnete RN-Konzentration in der Kammer | 647 | ± | 34 | [Bq / m1 |
| Minimum-Maximum | 613 | -- | 681 | [Bq / m'] |

Anmerkungen:

Abb. 11. Bildschirm „Bericht“.

## 6. Berechnungsalgorithmen

Unter Verwendung der bekannten Zerfallsgesetze wird die Konzentration C von Radon ($^{222}Rn$) in der Radonkammer nach folgender Formel (1) berechnet:

$$C = \frac{A_i \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_z})}{V_i} \left[ \frac{kBq}{m^3} \right] \tag{1}$$

wo:

C – Konzentration von $^{222}Rn$ in der Radonkammer [kBq/m³]
Ai – Aktivität der Quelle [kBq] (i = 1, 2)
$A_1$ = 21,6 [kBq]
$A_2$ = 52,3 [kBq]
λ – Zerfallskonstante von $^{222}Rn$; λ = 0,007548 [$h^{-1}$]
tz – gesamte Radonsammelzeit [h]
(Sammelzeit in der Quelle + Zeit zum Umfüllen von Radon in die Kammer)
Vi – Gesamtvolumen des Messsystems [dm³]
(Kammervolumen + Volumen der Verbindungsschläuche)
$V_{200}$ = (211 + 4,12) dm³ – Kammer IFJ-KR-200
$V_{600}$ = (608 + 3,98) dm³ – Kammer IFJ-KR-600

Die Verschlusszeit der Radonquelle (sogenannte Sammelzeit), die zur Erreichung der gewünschten Radonkonzentration in der Kammer erforderlich ist, wird mit Formel (2) berechnet:

$$t_z = \frac{\ln\left( \left| 1 - \frac{c \cdot V_i}{A_i} \right| \right)}{-\lambda} \quad [h] \tag{2}$$

Die Exposition E, der die Geräte in der Radonkammer während der Zeit te ausgesetzt sind, wird berechnet mit:

$$E = c \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left(1 - e^{-\lambda \cdot t_e}\right) \quad \left[ \frac{kBq \cdot h}{m^3} \right] \tag{3}$$

wo:

λ – Zerfallskonstante von $^{222}Rn$; λ = 0,007548 [$h^{-1}$]
te – Expositionszeit [h]

Der gewünschte Expositionswert E in der Kammer wird durch Auswahl der geeigneten Gesamt-Sammelzeit tz (Formel 2) und Expositionszeit te (Formel 4) erreicht.

$$t_e = \frac{\ln\left| \left( 1 - \frac{\lambda \cdot E}{c} \right) \right|}{-\lambda} \quad [h] \tag{4}$$

Die Endkonzentration $C_k$ von Radon in der Kammer nach der Expositionszeit $t_e$ wird nach Formel (5) berechnet:

$$C_k = C_p \cdot e^{-\lambda \cdot t_e} \quad \left[\frac{kBq}{m^3}\right] \tag{5}$$

wobei:

$C_k$ – Endkonzentration von Radon in der Kammer
$C_p$ – Anfangskonzentration von Radon in der Kammer

Falls in der Kammer Messgeräte mit bekanntem Volumen platziert werden, muss dieses Volumen bei der Berechnung des Gesamtvolumens des Messsystems berücksichtigt werden.

## 7. Anwendung der Kalibrierkammern

Die oben beschriebenen Radon-Kalibrierkammern werden im Labor für natürliche Radioaktivität (LPN) für Forschungsarbeiten eingesetzt, insbesondere zur Entwicklung von Messmethoden für Radonkonzentrationen mit passiven Detektoren.

Darüber hinaus dient das Kalibrierstand auch zur Kalibrierung verschiedener Typen von Radondetektoren, die von Institutionen aus ganz Polen geliefert werden, darunter:

- Berg- und Hüttenakademie Krakau (AGH)
- Medizinische Universität Białystok
- Büro für Schadensregulierung der Staatlichen Atomenergiebehörde, Außenstelle Jelenia Góra

Ein wichtiger Teil der Forschungsarbeiten im LPN betrifft die Radonmessung mit passiven Detektoren, die auf Adsorption von Radon durch Aktivkohle beruhen [5, 6]. Es werden zwei Haupttypen von Kohledetektoren verwendet:

- mit Diffusionsbarriere (für die Messung der Radonkonzentration in Innenräumen)
- sogenannte „open-face“-Detektoren (für Messungen der Radonexhalation aus dem Boden)

Diese Detektoren wurden am beschriebenen Kalibrierstand kalibriert.
Die Kalibrierung passiver Detektoren dauert in der Regel mehrere Tage, was zu einem Abfall der Anfangskonzentration führt – verursacht durch den natürlichen Zerfall von Radon und seine Adsorption im Detektor.
Die Veränderungen der Radonkonzentration während der Kalibrierung von Kohledetektoren werden in Abb. 12 gezeigt.

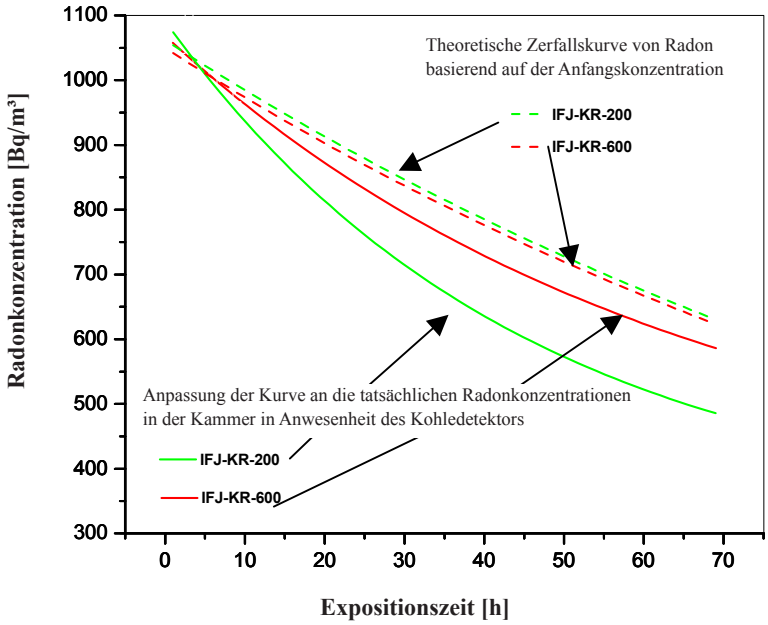



Abb. 12. Veränderungen der Radonkonzentration in den Kalibrierkammern während der Kalibrierung von Kohledetektoren [5].

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 13 – Abb. 15) sind beispielhafte Veränderungen verschiedener Parameter während der Messungen am Kalibrierstand dargestellt.

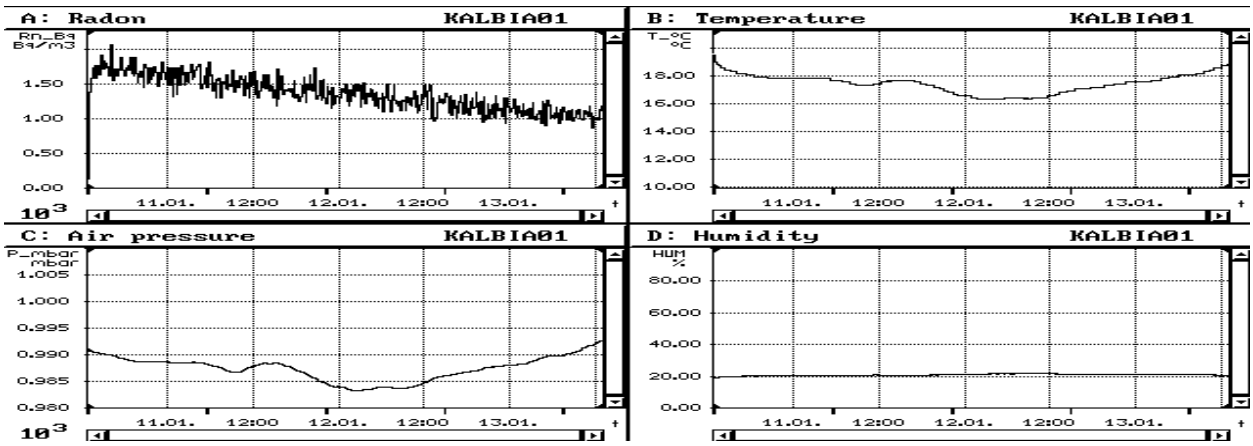



Abb. 13. Veränderungen klimatischer Parameter: Veränderungen der Radonkonzentration (A), Temperatur (B), Druck (C) und Luftfeuchtigkeit (D).

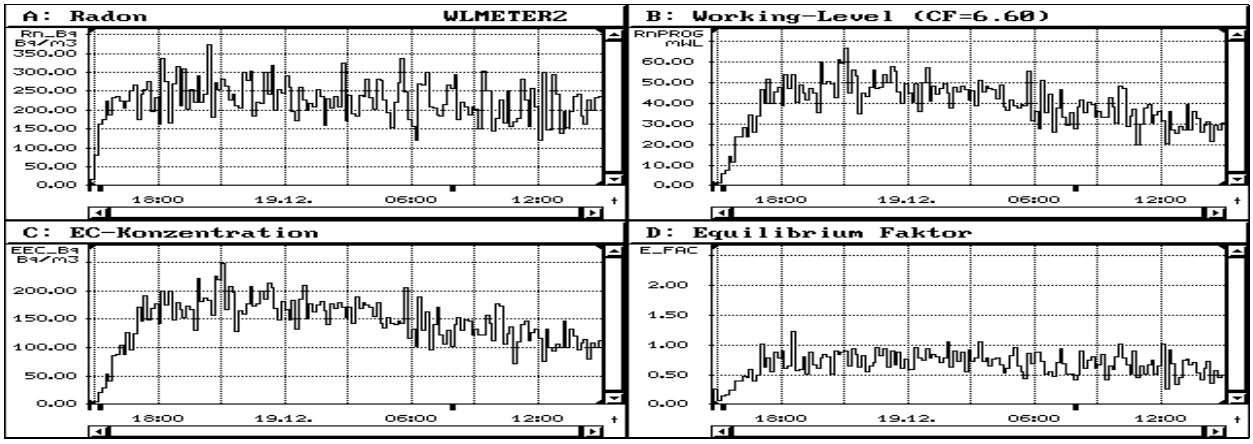



Abb. 14. Veränderungen der Radonkonzentration (A), des Working Level (B), der äquivalenten Radonkonzentration (C) und des Gleichgewichtsfaktors (D)

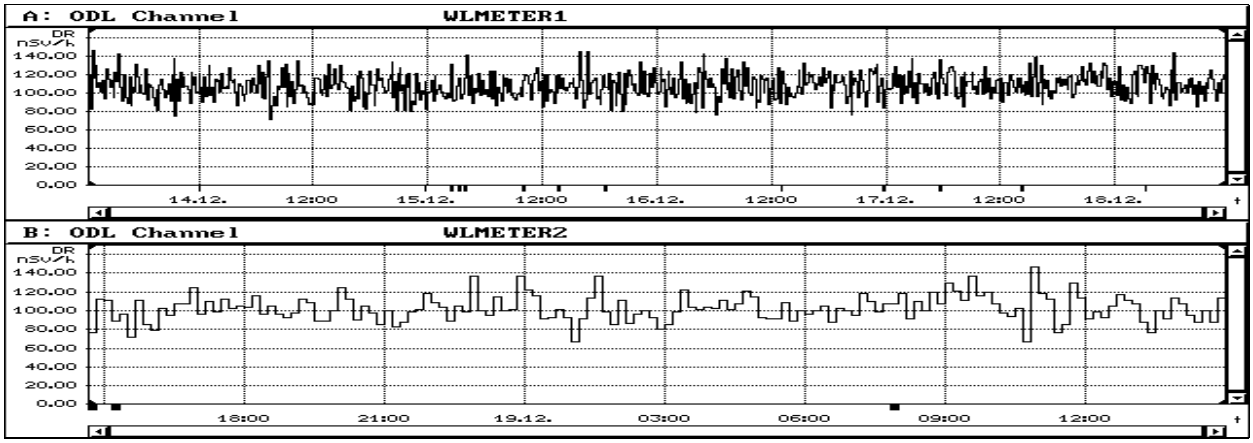



Abb. 15. Veränderungen der Äquivalenten Dosisleistung [nSv/h]; über mehrere Stunden (A) und über mehrere Tage (B)

LITERATUR

1. D. Mazur, M. Janik, J. Łoskiewicz, P. Olko, J. Swakoń, „Messungen der Radonkonzentration im Bodenluft mit CR-39-Detektoren“, Radiation Measurements 31 (1999), 295–300.
2. A. C. George, „Passive integrierte Messung von Innenraumradon mit Aktivkohle“, Health Physics, 46 Nr. 4 (1984), 867–872.
3. Benutzerhandbuch – Tragbares Radonmessgerät „AlphaGUARD“, Genitron Instruments 4/97.
4. Kalibrierzertifikat Radium-226, PYLON Electronic Development Co. Ltd., 2001.
5. J. Bogacz, J. Mazur, J. Swakoń, M. Janik, „Kalibrierung von Aktivkohle-Detektoren in einer kleinen 222Rn-Expositionskammer“, Radiation Measurements 33 (2001), 873–878.
6. J. Bogacz, J. Mazur, J. Swakoń, M. Budzanowski, P. Olko, „MCP-N (LiF:Mg,Cu,P) TLDs für Radonmessungen mit Kohlebehältern“, Radiation Protection Dosimetry 101 (2002), 267–270.
7. J. Swakoń, K. Kozak, M. Paszkowski, J. Łoskiewicz, P. Olko, R. Gradziński, J. Mazur, M. Janik, J. Bogacz, R. Haber, T. Zdziarski, „Radonmessungen in der

Bodenluft in der Region Krakau“, Bericht IFJ Nr. 1895/B, Kraków, Februar 2002.