

IOK - Betrachtungen

Unsortierte Sammlung von Gedanken im Zusammenhang mit dem Bau von Ionisationskammern

#01. Erdnussdosen (ALDI, Marke Trader Joe's ®, 0,89 € @ 2021-08)	2
#02. Überlegungen zum praktischen Aufbau einer großvolumigeren IOK	6
#03. Überlegungen zum praktischen Aufbau einer noch großvolumigeren IOK	7
#04. Elektrische Feldstärke und Ladungsträgerlaufzeit im Innern einer zylindrischen IOK	9
#05. Dicke stramm aufgewickelten Materials	12
#06. Anteil der bei isotroper Emission in den Raumwinkel $2\cdot\delta$ emittierten Teilchen	13
#07. Abdeckung der Luftoffenen IOK - Anteil der offenen Fläche bei Rundlochstrukturen	14
#08. Die wichtigsten Strahlungs- und Dosisgrößen	19
#09. Umrechnung von Ionendosis und Energiedosis für das Medium Luft	21
#10. Umrechnung von Ionendosis und Energiedosis für andere Substanzen als Luft	22
#11. Messbarkeit der natürlichen Umgebungsstrahlung mittels einfacher, luftgefüllter IOKs	23
#12. Messung // Abschätzung des Isolationswiderstands eines Reedkontaktes	25
#13. Wie stark schädigt uns die natürliche Umgebungsstrahlung ?	26
#14. Ionisierungsvermögen von 5,3-MeV- α -Strahlung in Luft	28
#15. Abschätzung der Nachweisbarkeit von mit Po-210 vergiftetem Tee mit dem LKD	30
#16. Die Thorium-Zerfallsreihe und der Nachweis ihrer Aktivität mit dem LKD	34
#17. Schaltungsberechnung: Differenzverstärker	36
#18. Messkammer zum Monitoring der Radon-222-Konzentration in Innenräumen	38
#19. Gedanken zum Bau eines eigenen Prototypen einer Rn-222 - Messkammer	42

© 2021-2024 Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Rolf Goedecke, Bremen Dr.Rolf.Goedecke@t-online.de
Änderungen durch den Autor sind jederzeit auch ohne Benachrichtigung vorbehalten. Für Fehler oder zufällig oder sonstwie auftretende Folgeschäden wird keine Haftung übernommen; jegliche Gewährleistung ist ausgeschlossen. Jegliche Nutzung erfolgt auf eigene Gefahr. Alle Warenzeichen bzw. Marken sind Eigentum der jeweiligen Inhaber und werden ohne Gewährleistung einer freien Verwendung benutzt. Namen und Abkürzungen werden in der im Text erklärten Bedeutung benutzt; eine eventuelle Übereinstimmung mit außerhalb dieses Textes verwendeten Bezeichnungen wäre rein zufällig.

#01. Erdnussdosen (ALDI, Marke *Trader Joe's*®, 0,89 € @ 2021-08)

Die als Grundelemente verwendeten Blechdosen besitzen folgende Eigenschaften (eigene Messungen):

1. Material: Stahlblech verzinkt 0,2 mm (sog. Dosenblech), Außenlackierung
2. Außenhöhe gesamt (Unterkante unterer Falzrand - Oberkante oberer Falzrand): 73,6 mm
3. Außen-Ø Dosenkörper: 83,8 mm
4. Innen-Ø Dosenkörper: $\approx 83,3$ mm
5. Außen-Ø oberer Falzrand: 85,2 mm
6. Innen-Ø oberer Falzrand: 82,8 mm
7. Höhe oberer Falzrand über RingPull-Deckel-Oberseite: 3,8 mm
8. Außen-Ø unterer Falzrand: 82,3 mm
9. Innen-Ø unterer Falzrand: 78,8 mm
10. Höhe unterer Falzrand unter Boden-Außenseite: 3,4 mm
11. Innenhöhe (Boden-Innenseite - RingPull-Deckel-Oberseite): 67,0 mm
12. Innen-Ø RingPull-Deckelrand nach Öffnung: $\approx 77,5$ mm
13. Massen: 34 g (Dose ohne Deckel), 7 g (Deckel)



Bei Stapelbildung greift, wie bei heutigen Konservendosen üblich, der untere Falzring der oberen Dose also in den oberen Falzring der unteren Dose, so dass eine stabile Stapelung gewährleistet ist. Bei geöffneter Dose kann, wie bei den Prototypen der luftoffenen IOKs praktiziert, ein Lochdeckel mit Außen-Ø ≈ 82 mm (= o.g. Wert 6.) auf den verbliebenen Rand des RingPull-Deckels gelegt und am Dosenkörper geeignet befestigt werden, ohne dass die Führung bei der Stapelung ganz verloren geht. Die frei nutzbare Innenhöhe beträgt dann 67 mm (o.g. Wert 11.).

Der Deckel besitzt (zur Stabilitäts-erhöhung) eingeprägte Formstrukturen und ist zusätzlich nach Dosenöffnung (RingPull-Betätigung wie vorgesehen) typischerweise so verformt, so dass er aus jetziger Sicht nicht mehr sinnvoll weiterverwendet werden kann.



Dagegen stellt sich die Frage, ob zwei (oder mehrere) Dosen dieses Typs durch Abtrennung des Dosenbodens, Stapelung und Fixierung (z.B. durch Verlöten der ineinander gestapelten Falzränder) zu einer ungefähr doppelt (bzw. n -fach) hohen Dose erweitert werden können. Solch ein Verfahren könnte sowohl für die Erstellung von Hilfskonstruktionen (nahezu luftdicht abschließender Probenraum, z.B. wie bei der Testmessung der Ausgasung aus dem Glühstrumpf), wie auch für die Konstruktion größerer Messkammern interessant sein.

Ein erster Versuch der Abtrennung des Dosenbodens mit einem einfachen Dosenöffner führte allerdings infolge der beim Schneidevorgang auftretenden erheblichen Kräfte, auch durch das Transportrad des Dosenöffners, zu einer deutlichen Verformung des verbleibenden Dosenmantels, der diesen für den vorgesehenen Zweck unbrauchbar machte. Der Effekt wird - wie nebenstehend gezeigt - besonders deutlich sichtbar beim eigentlich vorgesehenen Anwendungszweck: der Stapelung mehrerer Dosen aufeinander.



Der Dosenboden muss also bei Bedarf mit einem deutlich kräfteschonenderen Verfahren abgetrennt werden, z.B. durch vorsichtiges Aufsägen des Bodenblechs mit einer Miniatur-Trennscheibe ($\varnothing 22\text{ mm}$) an einem Elektro-Kleinwerkzeug (eine der typischen schnell drehenden Niederspannungs-Handbohrmaschinen aus dem Hobby- bzw. Bastlerbedarf). Dies dauert je Dose zwar ein paar Minuten und verbreitet eine Menge Metallschmutz, lässt die Form des Dosenkörpers bei vorsichtiger Handhabung jedoch unverändert. Bei ruhiger Arbeit ist das Bestehenlassen eines Randstücks des formstabilisierenden Dosenbodens nicht erforderlich. Der äußerst scharfkantige und mit spitzen Metallspänen besetzte Schnittrand kann z.B. mit einer anschließend in demselben Werkzeug betriebenen Korundscheibe ($\varnothing 22\text{ mm}$) geglättet und anschließend von Hand mit mehrfach gefaltetem Schleifpapier nachbearbeitet werden (wobei Kratzer in der Verzinnung des Doseninneren unbedingt zu vermeiden sind!).

Im unten gezeigten Beispiel wurden zwei Erdnussdosen in der beschriebenen Weise bearbeitet und anschließend luftdicht aufeinander gelötet. Die freie obere Öffnung wurde mit einem aufgelötetem Deckel aus Weißblech mit $\varnothing 85,2 \text{ mm}$ luftdicht verschlossen. Damit ist ein kleiner Turm entstanden, der mit seiner offenen Unterseite direkt auf den Prototypen des Messgerätes aufgesetzt, und mit diesem bei Bedarf - z.B. durch eine Umrundung mit Aluminium-Klebeband - zu einer Radon-dicht abgeschlossenen Einheit kombiniert werden kann. In dieser kann z.B. auch das aus einem Material exhalierende längerlebige Radon-222 im zeitlichen Aufbau bis hin zum Gleichgewicht gemessen werden.



Die freie Innenhöhe ist mit $h_i \approx 140 \text{ mm}$ so gegeben, dass ein Röhrchen mit dem aktuellen *de facto*-Standard "Hundsbühler Erde" (HBE) ausreichend Platz hat.

Achtung: Vergänglichkeit!

Wie alles irdische (Pflanzen, Tiere, Menschen), sowie viele von Letztgenannten eingeführte Errungenschaften des modernen Lebens, neigt auch die gemeine Erdnussdose (*lat.: urceus metallum arachis hypogaea communis*) auf nicht unmittelbar vorhersehbare, geradezu heimtückische Weise zu physikalischen und chemischen Stoffumwandlungen. In ihrem Originalzustand - d.h. hermetisch verschlossen und von freundlichen Zeitgenossen mit einem Mindesthaltbarkeitsdatum versehen - macht sie diesem normalerweise alle Ehre. Dagegen tritt nach Öffnung und Verzehr des Inhalts alsbaldiger Verfall ein.

Das zwecks Würzung hinzugefügte Mineral *Natriumchlorid* (*lat.: salis*) haftet der geleerten Dose in Teilen noch an und bindet auch in trocken gehaltenen Wohnräumen Luftfeuchte an sich. Diese führt auch am ideal verzinnnten Dosenblech zu gewissen, alsbaldigen Stoffumwandlungen. Das Bild zeigt zwei solche nach Leerung nicht gereinigte Dosen, nachdem diese über die Dauer von zwei Jahren normaler Raumluft ausgesetzt waren.



Es empfiehlt sich also, Erdnussdosen, die nach Genuss ihres Inhalts für die in diesem Papier beschriebenen technischen Zwecke weiterverwendet werden sollen, zeitnah einen einfachen, aber gründlichen Reinigungsprozess auf Basis von Wasser, Spülmittel, viel klarem Wasser, und anschließend sorgfältiger Trocknung mit einem Geschirrtuch durchlaufen zu lassen. Erst diese Grundreinigung macht die Weißblechoberflächen unter geeigneten Bedingungen hinreichend lagerbeständig und schließlich anwendungsg geeignet!

#02. Überlegungen zum praktischen Aufbau einer großvolumigeren IOK

Wird der oben beschriebene modulare Aufbau noch etwas weiter gedacht, so entsteht vor dem geistigen Auge eine IOK mit größerem Volumen als dem einer einzelnen Erdnussdose. Es bietet sich z.B. die Möglichkeit der luftdichten Stapelung und gelöteten elektrischen Verbindung von 3..6 einzelnen Dosen an. Die maximale Zahl der Einzelelemente wird sich aus der Forderung nach immer noch streng axialer Gestalt des Aufbaus ergeben. Die hervorragendsten Vorteile dieser Technik sind:

- + einfacher, kostengünstiger Aufbau mit Elementen aus präziser industrieller Serienproduktion
- + vollständige elektrische Abschirmung
- + hervorragende Lötbarkeit, dadurch auch problemlose Herstellung elektrischer Anschlüsse
- + ausreichende mechanische Stabilität.

Eine derartige Konstruktion könnte z.B. als Messkammer für Radon-222 in der Zimmerluft Anwendung finden, ähnlich der unter

https://www.theremino.com/en/files/IonChamberV7/Radon_IonChamberV7_Construction_ENG.pdf

beschriebenen Konstruktion mit ähnlichem Außendurchmesser. Durch den Zusammenbau aus einer nahezu frei wählbaren Anzahl von Elementen kann hier allerdings ein größeres Messkammervolumen, damit eine höhere Zählrate, und damit ein höheres Ansprechvermögen erreicht werden.

Die **mechanischen Kennwerte** sind:

- Innen-Ø Dosenkörper (Maß 4): $\approx 83,3 \text{ mm}$
- Höhe je Element (Maß 2 - Maß 7): $73,6 \text{ mm} - 3,8 \text{ mm} = 69,8 \text{ mm}$ (wobei für die Endelemente kleine Abschläge entsprechend der jeweiligen Konstruktion einzurechnen sind).

Das **umschlossene Luftvolumen** beträgt je Element:

$$V_{\text{Luft}} = a \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 0,0698 \text{ m} \cdot \frac{(0,0833 \text{ m})^2 \cdot \pi}{4} = \mathbf{0,0003804 \text{ m}^3}$$

und die je Element **umschlossene Luftmasse**:

$$m_{\text{Luft}} = V_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} = 0,0003804 \text{ m}^3 \cdot 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{0,0004580 \text{ kg}}$$

Mit den Daten:

- $\epsilon = \epsilon_0 = 8,852 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ = Elektrische Feldkonstante des Vakuums
- $a = 0,0698 \text{ m}$ = Rohrlänge je Element
- $R_A = 0,04165 \text{ m}$ = Mantelinnenradius
- $R_I = 0,002 \text{ m}$ = Außenradius des Innenleiters

beträgt die **elektrische Kapazität** zwischen den Elektroden **je Element** in diesem Beispiel

$$C = \frac{2 \pi \cdot \epsilon \cdot a}{\ln \frac{R_A}{R_I}} = \frac{2 \pi \cdot 8,852 \cdot 10^{-12} \text{ Vs} \cdot 0,0698 \text{ m}}{A \text{ m} \cdot \ln \frac{0,04165 \text{ m}}{0,002 \text{ m}}} = \mathbf{1,279 \text{ pF}}$$

#03. Überlegungen zum praktischen Aufbau einer noch großvolumigeren IOK

Anforderungen:

1. Der Aufbau muss eine mechanisch ausreichende Stabilität besitzen
2. Die zu verwendenden Bauelemente sollen leicht und kostengünstig erhältlich sein
3. Der Selbstbau (ohne große, haushaltsuntypische Maschinen) muss praktikabel sein
4. Das Kammermaterial muss (zumindest annähernd) bzgl. Strahlung luftäquivalent sein
5. Die Innenleitfähigkeit der Kammerwand muss dauerhaft gewährleistet sein

Zu 1. und 2., sowie 4.:

Hier bieten sich die diversen Rohrelemente an, wie sie typischerweise beim Hausbau verwendet werden und als preiswerte Massenartikel angeboten werden. Metallrohre (im Handel z.B. als Ofenrohre sowie Regenfallrohre) besitzen allerdings aus Stabilitätsgründen eine Materialdicke, die die typische locker ionisierende Umgebungsstrahlung (Beta- und Photonenstrahlung) bei kleinen Energien deutlich schwächt, insbesondere, wenn sie nicht aus Aluminium, sondern aus Material mit höherer Kernladungszahl (z.B. Stahl oder Kupfer) bestehen. Wenn die zu messende Strahlung also die Kammerwand durchdringen soll, scheiden solche Materialien aus.

Bzgl. Beta- und Photonenstrahlung nahezu luftäquivalent sind dagegen Materialien, die aus Atomen kleiner Kernladungszahlen bestehen, wie z.B. H, C, O, ...

Grundsätzlich bieten sich also Rohrelemente aus Kunststoff an, und zwar nach Möglichkeit solche, die dauerhaft, also z.B. lichtfest sind. Damit sind insbesondere Rohrelemente aus PVC geeignet.

Zu 3.:

Die Bearbeitung sollte einigermaßen leicht im Hobbykeller möglich sein - allerdings stößt man bei massivem PVC mit Handgeräten schon bald an seine Grenzen ! Kunststoffe neigen infolge der bei mechanischer Bearbeitung entstehenden Reibungswärme zum Schmelzen, so dass saubere Schnittkanten schwer herstellbar sind (manuell am ehesten noch durch Nass-Schleifen - bei diesem Vorgang erfolgt der Materialabtrag allerdings quälend langsam !).

Der Vorteil bei festen Rohrelementen aus Hart-PVC ist andererseits, dass sie nicht biegsam sind, und daher vmtl., falls überhaupt, sehr wenig Weichmacher enthalten.

Zu 5.:

Die Herstellung der Innenleitfähigkeit eines PVC-Rohres ist ein größeres Problem. Theoretisch wäre für die Anwendung als IOK-Elektrode eine Innenlackierung mit hochohmig leitfähiger Farbe ausreichend, aber deren saubere Aufbringung sowie deren dauerhafte Haftung an der sehr glatten Innenwandung längerer Rohre erscheint höchst unpraktikabel.

Eine zumindest vorstellbare Lösung besteht in der Aufbringung von Aluminium-Klebeband. Hierbei ist allerdings die praktikable Rohrlänge auf ca. 0,5 m begrenzt, da die Kleberolle noch bei durchgestecktem Arm am Rohrende greifbar sein muss. Der Mindest-Rohrdurchmesser bemisst sich nach dem Durchmesser der Klebeband-Rolle sowie der Armdicke, und liegt nicht unter 125 mm (100 mm freier Innendurchmesser wären für die Klebeband-Rolle zu wenig).

Fazit:

Eine nicht-metallische Messkammer kann nach diesen Überlegungen also bestehen aus einem (normalerweise für die Abwasser-Ableitung gedachten) Kunststoffrohr von $d = 125 \text{ mm}$ Innendurchmesser (entsprechend $U = 392,7 \text{ mm}$ Innenumfang) und $a = 0,5 \text{ m}$ Länge (DN 125 nach DIN 19534 aus PVC-U), das innen mit Aluminium-Klebeband ausgekleidet ist. Die Klebeband-Rolle kann bei durchgestecktem Arm am Rohrende angesetzt und dann im sauberen, staubfreien Rohr abgerollt und unmittelbar im Anschluss angedrückt und geglättet werden, wobei von Bahn zu Bahn eine leichte Überlappung herzustellen ist, damit der Innenraum komplett geschirmt ist. Bei einer Klebeband-Breite von $B = 50 \text{ mm}$ wären 10 Bahnen (Gesamtlänge netto 5 m) erforderlich, wenn man für die Überlappungsbreite nicht mehr als im Mittel 1 cm benötigt.

Die einzelnen Aluminium-Bahnen sind zunächst nicht sicher elektrisch miteinander verbunden, da sie durch die Kleberschicht mehr oder weniger vollständig voneinander getrennt und damit isoliert sind. Die Verbindung könnte an beiden Rohrenden durch Aufdrücken je eines innen rundum führenden, leitfähigen Blechstreifens, oder auch (zusätzlich) durch Aufsprühen von leitfähigem Lack hergestellt werden (dies ist aus praktischen Gründen ebenfalls nur an den Endbereichen möglich).

Das **umschlossene Luftvolumen** dieser Konstruktion beträgt:

$$V_{\text{Luft}} = a \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 0,5 \text{ m} \cdot \frac{(0,125 \text{ m})^2 \cdot \pi}{4} = \mathbf{0,006136 \text{ m}^3}$$

und die **umschlossene Luftmasse**:

$$m_{\text{Luft}} = V_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} = 0,006136 \text{ m}^3 \cdot 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mathbf{m_{Luft} = 0,007388 \text{ kg}}$$

Mit den Daten

- $\epsilon = \epsilon_0 = 8,852 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ = Elektrische Feldkonstante des Vakuums
- $a = 0,5 \text{ m}$ = Rohrlänge
- $R_A = 0,0625 \text{ m}$ = Mantelinnenradius
- $R_I = 0,003 \text{ m}$ = Außenradius des Innenleiters

beträgt die **elektrische Kapazität** zwischen den Elektroden in diesem Beispiel

$$C = \frac{2 \pi \cdot \epsilon \cdot a}{\ln \frac{R_A}{R_I}} = \frac{2 \pi \cdot 8,852 \cdot 10^{-12} \text{ Vs} \cdot 0,5 \text{ m}}{A \text{ m} \cdot \ln \frac{0,0625 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}}$$

$$\mathbf{C = 9,16 \text{ pF}}$$

#04. Elektrische Feldstärke und Ladungsträgerlaufzeit im Innern einer zylindrischen IOK

Im Inneren der Kammer stehen die Feldlinien senkrecht auf dem Mittelleiter mit dem Außenradius R_I und führen gerade (auf kürzestem Weg) zum Mantelleiter (mit dem Innenradius R_A), auf dem sie ebenfalls wieder senkrecht enden. (Randeffekte an den Leiterenden werden hier nicht betrachtet.) Ladungen Q verteilen sich gleichmäßig auf der Außenfläche $A = 2\pi R_I a$ des Innenleiters der Länge a , so dass die Feldstärke an diesem Ort R_I bzw. allgemein im Abstand r vom Zentrum

$$E = \frac{Q}{2\pi R_I \cdot a \cdot \epsilon} \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{Q}{2\pi r \cdot a \cdot \epsilon}$$

beträgt, wobei $Q = C \cdot U$ ist. Mit der Kapazität des Zylinderkondensators

$$C = \frac{2\pi \cdot a \cdot \epsilon}{\ln \frac{R_A}{R_I}}$$

erhält man

$$E = \frac{C \cdot U}{2\pi r \cdot a \cdot \epsilon} = \frac{2\pi \cdot a \cdot \epsilon \cdot U}{2\pi r \cdot a \cdot \epsilon \cdot \ln \frac{R_A}{R_I}} \quad \text{und folglich} \quad E = \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{\ln \frac{R_A}{R_I}}.$$

Der **Ionisationsvorgang für Luft** kann ungefähr wie folgt charakterisiert werden:

Durch Ionisierende Strahlung werden meist einzelne Hüllenelektronen von vorher neutralen N_2 - bzw. O_2 -Molekülen abgetrennt, wodurch deren geladene Molekülrümpfe N_2^+ bzw. O_2^+ entstehen. Die freigesetzten Hüllenelektronen sind in Luft nicht stabil; sie lagern sich an ein anderes, vormals neutrales Luftmolekül an und bilden so N_2^- bzw. O_2^- . Dies alles passiert innerhalb kürzester Zeit (ca. $0,1 \mu s$); die Ionenbeweglichkeit (bei Normaldruck) im elektrischen Feld liegt nun bei $k \approx 4 (cm/s) / (V/cm)$.

Zum Begriff der **Ionenbeweglichkeit**:

Kleinionen werden im elektrischen Feld beschleunigt, stoßen aber dabei immer wieder in stochastischer Folge mit anderen Luftmolekülen zusammen. Die Feldwirkung ist damit nicht die einer konstanten Beschleunigung mit der Erreichung immer höherer Geschwindigkeiten, sondern die der praktisch sofortigen Erreichung einer konstanten (End-)Geschwindigkeit im elektrischen Feld. Die Kleinionen verhalten sich damit in der Luft ähnlich einem Körper im freien Fall im Schwerfeld der Erde, der nach kurzer Beschleunigungsphase infolge Luftreibung rasch in konstante Geschwindigkeit übergeht. Die Ionengeschwindigkeit kann daher als proportional zur Feldstärke angenommen werden (vgl. oben: Einheit des Faktors k).

Das hohe Ladungungleichgewicht der Ionen (hohe lokale Feldwirkung in die Umgebung) führt zur schnellen Anlagerung einer Anzahl (z.B. 6...10) neutraler Luftmoleküle (oder, sofern vorhanden, Wasserdampfmoleküle). **Die so entstandenen Molekülcluster sind die eigentlichen (positiven oder negativen) Kleinionen.** Sie besitzen bei Normaldruck eine typische Ionenbeweglichkeit im elektrischen Feld von $k \approx 1,5 \text{ (cm/s) / (V/cm)}$ sowie (in sauberer Luft) eine Lebensdauer von bis zu 100 s. Das Ende der Existenz als Kleinion erfolgt durch Anlagerung z.B. an ein Staubteilchen, wodurch das Kleinion zu einem Großion mit ganz deutlich - z.B. um einen Faktor 4000 - kleinerer Beweglichkeit wird.

Da die Ionengeschwindigkeit bei Normaldruck als proportional zur Feldstärke angenommen werden kann, ist der Ansatz möglich:

$$v_{\text{Ion}} = \frac{dr_{\text{Ion}}}{dt_{\text{Ion}}} = k \cdot E \quad \text{mit der Proportionalitätskonstanten**} \quad k \approx 1 \frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$$

$$\text{oder} \quad dt_{\text{Ion}} = \frac{1}{k \cdot E} \cdot dr_{\text{Ion}} \quad \text{mit**} \quad k \approx 0,0001 \frac{\text{m/s}}{\text{V/m}}$$

$$dt_{\text{Ion}} = \frac{\ln \frac{R_A}{R_I}}{k \cdot U} \cdot r \cdot dr_{\text{Ion}}$$

Die Gesamtzeit für das Eintreffen aller von einem Ionisationsereignis im Gasraum erzeugten Ladungen auf der Mittelelektrode ergibt sich durch Integration:

$$t_{\text{Ion}} = \frac{\ln \frac{R_A}{R_I}}{k \cdot U} \cdot \int_{R_I}^{R_A} r \cdot dr_{\text{Ion}} = \frac{\ln \frac{R_A}{R_I}}{k \cdot U} \cdot \left[\frac{1}{2} r^2 \right]_{R_I}^{R_A}$$

$$t_{\text{Ion}} = \frac{\ln \frac{R_A}{R_I}}{2 \cdot k \cdot U} \cdot (R_A^2 - R_I^2)$$

** $k \approx 1 \text{ (cm/s) / (V/cm)}$ ist ein in der Literatur häufig genannter Wert, der hier wegen seiner Anschaulichkeit eingesetzt wird. Die Angaben für k variieren je nach Quelle und Definition. Z.B.:

- $k = 1 \text{ (cm/s) / (V/cm)}$: Federmann, Georg: Victor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung. Institut für Radiumforschung und Kernphysik, Wien. Diplomarbeit 2003, S. 10.
- $k \approx 2 \text{ (cm/s) / (V/cm)}$: Tappler, Peter: raumluft.org Mensch - Umwelt - Gesundheit. http://www.raumluft.org/fileadmin/dokumente/raumluft.org_-_Info_Ionen.pdf (DL 2021-09-11)
- $k \geq 0,6 \text{ (cm/s) / (V/cm)}$: Holbach, Helmut: Messung der Kleinionen in der Raumlufte. http://www.komfortlueftung.at/fileadmin/komfortlueftung/EFH/Kleinionen_in_der_Raumlufte.pdf (DL 2021-09-11)
- $k \geq 1,5 \text{ (cm/s) / (V/cm)}$: Külpmann, Rüdiger (Hochschule Luzern): Luftionengehalt - Bewertungsmaßstab für die Raumluftequalität? Vortrag für die VDI- und DKV-Bezirksvereine Karlsruhe, 18.06.2019. https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/vor_ort/bv/karlsruher-bv/dateien/VDI-DKV-Vortrag-KA-Kuer2019.pdf (DL2021-09-11)

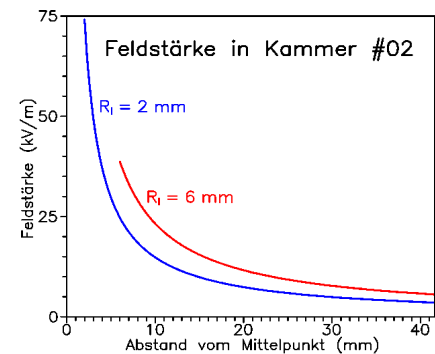
Beispiele für Ladungssammelzeiten:

Mit den Daten einer IOK aus einem Dosenstapel (vgl. #02):

- $U = 450 \text{ V}$ = Moderate Betriebsspannung
- $R_A = 0,04165 \text{ m}$ = Mantelinnenradius
- R_I = Außenradius des Innenleiters

erhält man mit $k = 0,0001 \text{ (m/s)} / \text{(V/m)}$:

- mit $R_I = 0,002 \text{ m}$: $t_{Ion} = 58,4 \text{ ms}$ $C = 1,28 \text{ pF/Element}$
- mit $R_I = 0,006 \text{ m}$: $t_{Ion} = 36,6 \text{ ms}$ $C = 2,00 \text{ pF/Element}$

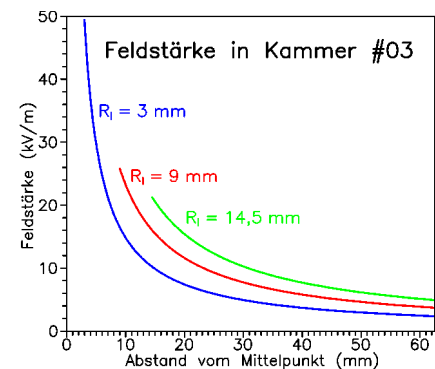


Mit den Daten der IOK aus PVC-Rohr (vgl. #03):

- $U = 450 \text{ V}$ = Moderate Betriebsspannung
- $R_A = 0,0625 \text{ m}$ = Mantelinnenradius
- R_I = Außenradius des Innenleiters

erhält man mit $k = 0,0001 \text{ (m/s)} / \text{(V/m)}$:

- mit $R_I = 0,003 \text{ m}$: $t_{Ion} = 131,5 \text{ ms}$ $C = 9,16 \text{ pF/0,5 m}$
- mit $R_I = 0,009 \text{ m}$: $t_{Ion} = 82,4 \text{ ms}$ $C = 14,35 \text{ pF/0,5 m}$
- mit $R_I = 0,0145 \text{ m}$: $t_{Ion} = 60,0 \text{ ms}$ $C = 19,03 \text{ pF/0,5 m}$



Bei größeren k (als 1) verkürzt sich der Zeitraum des Eintreffens der Ladungen entsprechend.

Der auffallende Unterschied in der zu erwartenden Ionenlaufzeit bei doch recht ähnlichen Kammerabmessungen lässt sich so verstehen, dass die Feldstärke in den Außenbereichen klein ist, und die Ladungen in den Außenbereichen anfänglich über eine größere Wegstrecke nur mit kleinen Geschwindigkeiten unterwegs sind. Außerdem ist natürlich die Wegstrecke dieser Außenbereiche größer.

Die Relevanz dieser Abschätzungen der Ladungssammelzeit ergibt sich aus der Notwendigkeit, dass die Kette aus ladungsempfindlichem Vorverstärker und Hauptverstärker jeweils auf die Ladungssammelzeit abgestimmt sein muss. **Wenn Alpha-Zerfälle in der Kammer einzeln nachgewiesen werden sollen, so ist außerdem eine möglichst kurze Ladungssammelzeit wichtig, damit sich mehrere rasch aufeinanderfolgende Ereignisse nur sehr selten überlagern.**

#05. Dicke stramm aufgewickelten Materials

Hier soll die elementare, aber bei praktischen Arbeiten mehrfach benötigte Formel zur Berechnung der Dicke d von in Rollenform stramm aufgewickeltem Material hergeleitet werden. Dabei kann es sich z.B. um Rollen von Haushalts-Klarsichtfolie (= Frischhaltefolie, Adhäsionsfolie), Aluminium-Folie, Aluminium-Klebeband, Isolierband, Packband, etc. handeln. Bei derartigen kommerziell erhältlichen Artikeln sind zwecks Produktbeschreibung i.d.R. die Breite B (die auch stets trivial nachgemessen werden kann), sowie die Gesamtlänge L angegeben.

Zusätzlich sind an der Originalrolle leicht (z.B. mit einem Messschieber) der Innendurchmesser des Wickelpakets (bzw. der Durchmesser des Wickelkerns) sowie der Außendurchmesser abnehmbar, so dass auch Innenradius R_I sowie Außenradius R_A des Materials bekannt sind.

Die Gesamtlänge L des Materials ist gleich der Windungszahl n mal dem Umfang U :

$$L = n \cdot U = n \cdot 2 \pi \cdot \frac{R_A + R_I}{2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{n} = \frac{\pi}{L} \cdot (R_A + R_I)$$

Andererseits ist die Dicke D des Wickelpakets

$$D = n \cdot d = R_A - R_I \quad \text{bzw.} \quad d = \frac{1}{n} \cdot (R_A - R_I)$$

Damit ist:

$$d = \frac{\pi}{L} \cdot (R_A + R_I) \cdot (R_A - R_I)$$

$$d = \frac{\pi}{L} (R_A^2 - R_I^2)$$

Bsp.:

Eine Rolle Aluminium-Klebeband (Produktname ALU 901 AC, EAN 4002168834004) aus einem Baumarkt (Handelsname **mako**® der Firma mako GmbH, D-91596 Burk), besitzt folgende Daten:

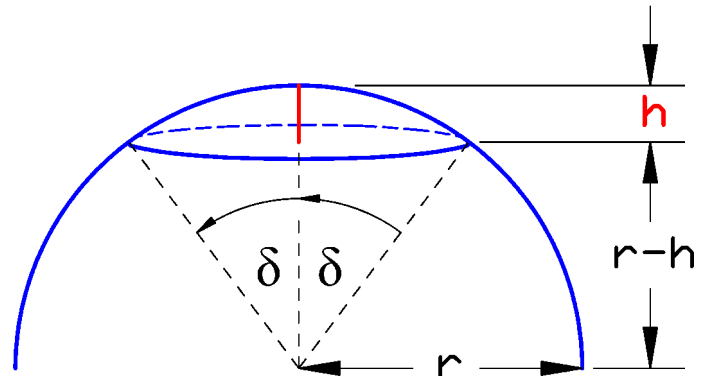
- $B = 50 \text{ mm}$
- $L = 10 \text{ m}$
- $R_A = 0,0449 \text{ m}$
- $R_I = 0,0407 \text{ m}$

Damit beträgt die berechnete Materialdicke (incl. Klebeschicht): $d = 0,11295 \text{ mm}$.

Wenn davon auf die Aluminiumschicht z.B. $50 \mu\text{m}$ oder auch $80 \mu\text{m}$ entfallen, so verspricht dies deutlich höhere Stabilität, als sie etwa Haushalts-Aluminiumfolie mit ihren $10 \mu\text{m}$ Materialdicke besitzt.

#06. Anteil der bei isotroper Emission in den Raumwinkel $2\cdot\delta$ emittierten Teilchen

Die isotrope Emission aus einem Punktstrahler erfolgt definitionsgemäß vom Emissionspunkt aus gleichmäßig in alle Raumrichtungen. Jedes Teilstück der Oberfläche einer um den Emissionspunkt herum gedachten Kugel wird also in jeweils flächenproportionalem Ausmaß von den Emissionen getroffen. Der Anteil k der in den Raumwinkel $2\cdot\delta$ emittierten Teilchen, bezogen auf die gesamte Kugel ergibt sich aus elementarer Berechnung:



$$\cos \delta = \frac{r - h}{r}$$

$$h = r (1 - \cos \delta)$$

Mit den Gleichungen der gekrümmten Außenflächen der Kugelkappe sowie der gesamten Kugel

$$A_{Kappe} = 2\pi r h \quad \text{und} \quad A_{Kugel} = 4\pi r^2 \quad \text{erhält man}$$

$$k = \frac{A_{Kappe}}{A_{Kugel}} = \frac{2\pi r h}{4\pi r^2}$$

$$k = \frac{A_{Kappe}}{A_{Kugel}} = \frac{1 - \cos \delta}{2}$$

Die Betrachtung der beiden Grenzfälle $\delta = 0^\circ$ bzw. $\delta = 180^\circ$ führt mit $\cos 0^\circ = 1$ bzw. $\cos 180^\circ = -1$ zu den höchst sinnvollen Ergebnissen $k = 0$ bzw. $k = 1$ (verschwindender Anteil bzw. maximaler Anteil von der Kugeloberfläche).

Die überwiegende Zahl der vom Emissionspunkt ausgehenden Teilchen tritt unter größerem Halbwinkel aus der Kugelkappe aus als unter kleinem Halbwinkel, weil die Fläche der Kugelkappe bei größerem Austrittswinkel überproportional zunimmt. Der mittlere Austrittswinkel ϵ teilt die Fläche der Kugelkappe (bei gegebenem δ) in zwei gleich große Teilflächen und beträgt:

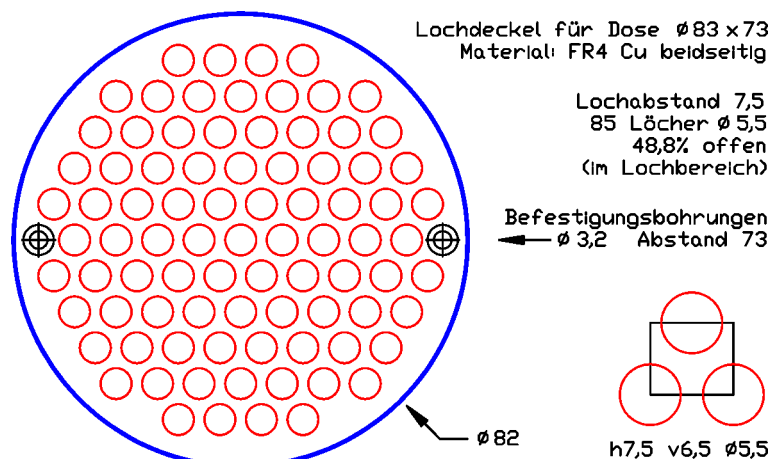
$$\frac{\frac{A_{Kappe}}{2}}{A_{Kugel}} = \frac{1 - \cos \epsilon}{2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{A_{Kappe}}{A_{Kugel}} = 1 - \cos \epsilon \quad \text{und folglich} \quad \cos \epsilon = 1 - \frac{A_{Kappe}}{A_{Kugel}}$$

$$\cos \epsilon = 1 - \frac{1 - \cos \delta}{2} = \frac{1 + \cos \delta}{2} \quad \text{und damit} \quad \epsilon = \arccos \frac{1 + \cos \delta}{2}$$

#07. Abdeckung der Luftoffenen IOK - Anteil der offenen Fläche bei Rundlochstrukturen

Die Abdeckung der luftoffenen Ionisationskammer soll die mechanisch größtmögliche Stabilität bei möglichst vollständiger elektrischer Abschirmung und gleichzeitig möglichst großer Durchlässigkeit für ionisierende Teilchenstrahlung gewährleisten. Die hierzu am besten geeignete Geometrie ist die regelmäßige Anordnung von Löchern gleicher Größe, deren jeweils benachbarte Mittelpunkte gleichseitige Dreiecke bilden (dichtestmögliche Lochpackung, größte Öffnungsfläche).

Für den ersten Prototypen wurde der Lochdeckel noch individuell aus Plattenmaterial FR4 mit beidseitiger Cu-Auflage hergestellt (vgl. Skizze). Es handelt sich jedoch um eine mühevolle und sehr schmutzige Arbeit (der Bohrvorgang erzeugt viel feinen, glasfaserhaltigen Staub), der man zudem im Ergebnis auch kleinste manuelle Abweichungen (z.B. durch mechanisches "Verlaufen" des Bohrers bei Anfertigung jedes Bohrlochs) deutlich ansehen kann. Da Rundlochbleche aus Metall mit der gewünschten Struktur im normalen Handel (Metallwarenhandel, Baumarkt) angeboten werden, lohnt die Selbsterstellung der IOK-Abdeckung im Grunde nicht, und es werden hier Überlegungen zur wünschenswerten Geometrie und ihrer Wirkung angestellt.



Die einzigen freien Kenngrößen des Rundlochblechs sind d und h (vgl. Detailbild):

d = Lochdurchmesser

h = horizontaler Lochabstand (Mittelpunkt zu Mittelpunkt)

Der vertikale Abstand v der horizontal jeweils um einen halben Lochabstand gegeneinander versetzten Lochreihen (damit sich die Lochmittelpunkte im Lochblech jeweils im identischen Abstand voneinander befinden und die Lochstruktur ausschließlich gleichseitige Dreiecke bildet), ergibt sich zwingend aus dem Satz des Pythagoras:

$$a^2 + v^2 = h^2$$

mit

h = horizontaler Lochabstand (Mittelpunkt zu Mittelpunkt)

v = vertikaler Abstand der Mittelpunkte der Lochreihen

a = halber horizontaler Lochabstand = $h/2$

Nach der Unbekannten v^2 bzw. v umgestellt ergibt sich:

$$v^2 = h^2 - \frac{h^2}{4} = \frac{3}{4}h^2 \quad \text{und} \quad v = \frac{h}{2}\sqrt{3}$$

Von der Fläche des (im Detailbild der Skizze gezeigten) Rechtecks $h \cdot v$ ist genau eine volle Kreisfläche ausgeschnitten. Also ist die optische Durchlässigkeit des Lochblechs theoretisch gleich:

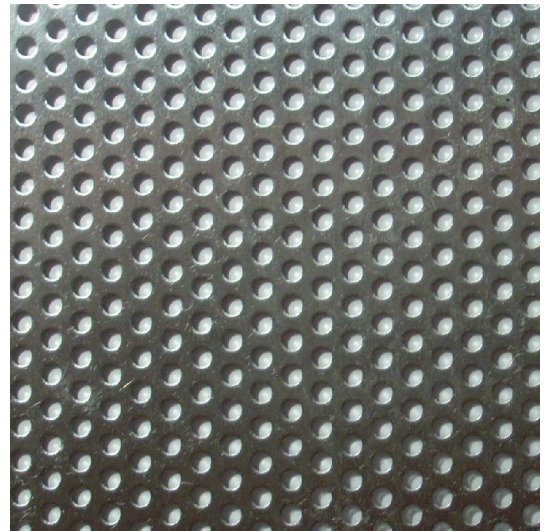
$$n = \frac{\pi d^2}{4 \cdot h \cdot v} = \frac{\pi d^2 \cdot 2}{4 \cdot h^2 \cdot \sqrt{3}}$$

$$n = \frac{d^2}{h^2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{d^2}{h^2} \cdot 0,9069$$

Als Grundlage für die manuelle Herstellung der Abdeckung erscheint z.B. das bei den genannten Händlern erhältliche Produkt gut geeignet (Recherche 2021-08):

1. **Rundlochblech Alu natur/blank**

- 500 mm · 250 mm · 0,8 mm (0,22 kg)
- Loch-Ø d = 2,0 mm, Lochabstand h = 3,5 mm
- Hersteller/Großhändler: GAH Alberts - Gust. Alberts GmbH, Blumenthal 2, D-58849 Herscheid
- EAN 4004338464240
- Erhältlich z.B. bei:
 - Bauhaus 464240: 9,50 €
 - Hornbach 7566022: 9,95 €
 - OBI 7806649: 9,99 €



Die Löcher müssten vmtl. einzeln aufgebohrt werden, denn die Anwendung der obigen Berechnung ergibt für die originale Lochgröße nur eine nicht wünschenswerte, vergleichsweise kleine Durchlässigkeit:

Loch-Ø d	Lochabstand h	Lochanteil n
mm	mm	-
2,0	3,5	0,296
2,1	3,5	0,326
2,2	3,5	0,358
2,3	3,5	0,392
2,4	3,5	0,426
2,5	3,5	0,463
2,6	3,5	0,500
2,7	3,5	0,540
2,8	3,5	0,580
2,9	3,5	0,623
3,0	3,5	0,666

Bei vorsichtiger Bearbeitung könnte die in der Tabelle markierte und fett gesetzte Zeile (Aufbohren der einzelnen Löcher auf $d = 2,7 \text{ mm}$ mit dem Ziel der Durchlässigkeit von $n = 0,54 = 54 \%$) einen geeigneten Kompromiss darstellen zwischen der erwünschten hohen Durchlässigkeit und der erforderlichen mechanischen Reststabilität.

Die gegenüber dem ersten Prototyp verkleinerte Strukturgröße (ungefähr halbiertes Lochdurchmesser und ungefähr halbiertes Lochabstand) wird eine noch verbesserte elektrische Abschirmung bewirken.

Im Handel sind noch **weitere Rundlochbleche** mit anderen Grunddaten erhältlich, z.B.

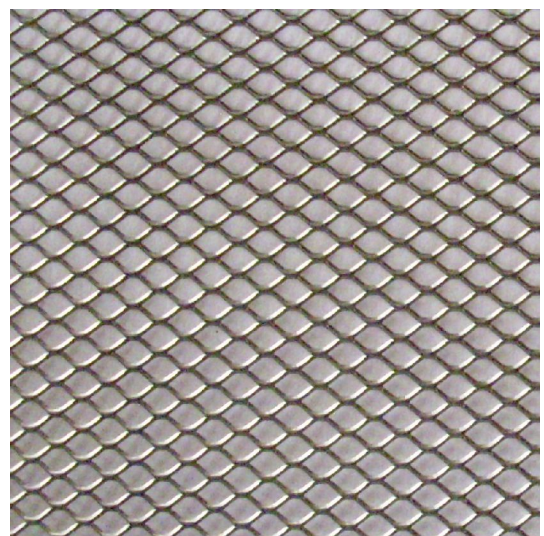
2. **$d = 2,5 \text{ mm}$, $h = 3,0 \text{ mm}$, Alu**, $500 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 0,8 \text{ mm}$, **silber eloxiert**, $0,21 \text{ kg}$,
OBI 3314028: 17,99 €
3. **$d = 3,1 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$, Alu**, $500 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 0,7 \text{ mm}$, **silber eloxiert**, $0,23 \text{ kg}$,
GAH Alberts - Gust. Alberts Gmbh, Blumenthal 2, D-58849 Herscheid. EAN 4004338466992
Bauhaus 466992: 12,65 €, Hornbach 7297023: 11,95 €, OBI 7806250: 13,99 €
4. **$d = 4 \text{ mm}$, $h = ?,?? \text{ mm}$, Alu**, $500 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 0,7 \text{ mm}$, **eloxiert**,
Kantoflex. Bauhaus 10245205: 12,65 €
5. **$d = 1,5 \text{ mm}$, $h = ?,?? \text{ mm}$, Alu**, $500 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 0,7 \text{ mm}$, **eloxiert**,
Kantoflex. Bauhaus 10245188: 14,00 €

Die elektrisch hochgradig isolierende Eloxalschicht dieser Bleche muss allerdings vor dem hier vorgesehenen Einsatz auf irgendeine Art (z.B. mechanisch oder chemisch) entfernt werden. Es gibt im Internet Anleitungen, nach denen eine Eloxalschicht durch ein Bad in konzentrierter Natronlauge (NaOH, es reicht bereits die in einigen zehn Gramm Abflussreiniger enthaltene Menge) aufgelöst werden kann (**Vorsicht, sehr ätzend; Hände und Augen schützen !!!**).

Ein anderes Material zur Erreichung der elektrischen Abschirmung des Doseninneren stellt das gleichermaßen im Metallwarenhandel oder Baumarkt angebotene **Streckmetallblech** dar, das aus unbehandeltem Stahl besteht (und somit zwar lötbar ist, aber auch sehr leicht rosten wird):

6. **Streckmetallblech Stahl roh**

- $500 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 1,2 \text{ mm}$ ($0,176 \text{ kg}$)
- Maschenlänge: 6 mm
- Maschenbreite: $3,4 \text{ mm}$
- Stegbreite: $0,6 \text{ mm}$
- Hersteller/Großhändler: GAH Alberts - Gust. Alberts Gmbh, Blumenthal 2, D-58849 Herscheid
- EAN 4004338467340
- Erhältlich z.B. bei:
 - Bauhaus 10245353: 4,65 €
 - Hornbach 7297032: 4,25 €
 - OBI 8736035: 5,29 €



(Es ist anhand der Angaben in den Internet-Angeboten nicht ganz klar, ob es sich bei den beschriebenen Produkten um jeweils genau dieselbe Ausführung von demselben Hersteller/Großhändler handelt.)

Die Durchlässigkeit dieses Materials für Teilchenstrahlung lässt sich optisch ausmessen. Hierzu wurde eine Solarzelle von $2\text{ cm} \cdot 2\text{ cm}$ sowie eine Solarzelle von $5\text{ cm} \cdot 5\text{ cm}$ verwendet, die in jeweils konstantem Abstand mit einer LED-Schreibtischlampe bestrahlt wurden. Der von der Solarzelle gelieferte Strom ist der Bestrahlungsstärke streng proportional, sofern dieser Strom im idealen Kurzschluss gemessen wird (d.h. bei $U = 0\text{ V}$).

Wenn der Kurzschluss nicht ganz ideal ist, wie dies bei der hier durchgeführten direkten Strommessung mit einem konventionellen digitalen Vielfachmessinstrument der Fall ist, ist der dadurch erzeugte Fehler um so kleiner, je kleiner die am Strommessgerät abfallende Restspannung ist. Im vorliegenden Fall wurde ein Strommessgerät mit Innenwiderstand $R_I = 1\ \Omega$ verwendet. Die Restspannung am Strommessgerät lässt sich damit aus den in der Tabelle genannten Messströmen problemlos ausrechnen; es ergeben sich Werte, die klein sind gegenüber den Leerlaufspannungen (insbesondere bei der kleinflächigeren Solarzelle).

Alle gemessenen Spannungen und Ströme beziehen sich auf die nicht weiter dokumentierte, für die betr. Solarzelle konstant gehaltene Bestrahlungsstärke.

Streckmetall - Messung des Lochanteils		
Messung mit	Solarzelle $20\text{ mm} \cdot 20\text{ mm}$	Solarzelle $50\text{ mm} \cdot 50\text{ mm}$
Solarzellentyp	Monokristallin	Polykristallin
Leerlaufspannung U_0	0,336 V	0,287 V
Messstrom ohne Streckmetall I_0	2,65 mA	15,23 mA
Messstrom mit Streckmetall I_S	1,64 mA	9,33 mA
Lochanteil $n = \frac{I_S}{I_0}$	0,6189 $\approx$ 61,9 %	0,6126 $\approx$ 61,3 %

Der beste Schätzwert für die anzunehmende Strahlendurchlässigkeit dürfte dem Ergebnis der Messung mit der kleineren Solarzelle von **$n = 61,9\%$** entsprechen.

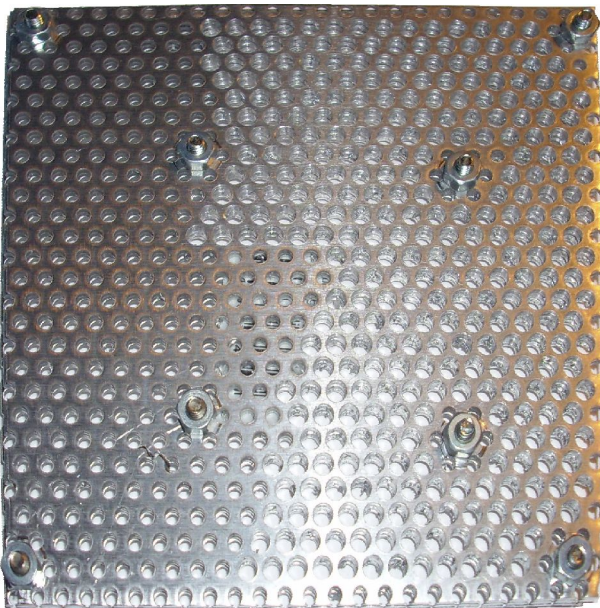
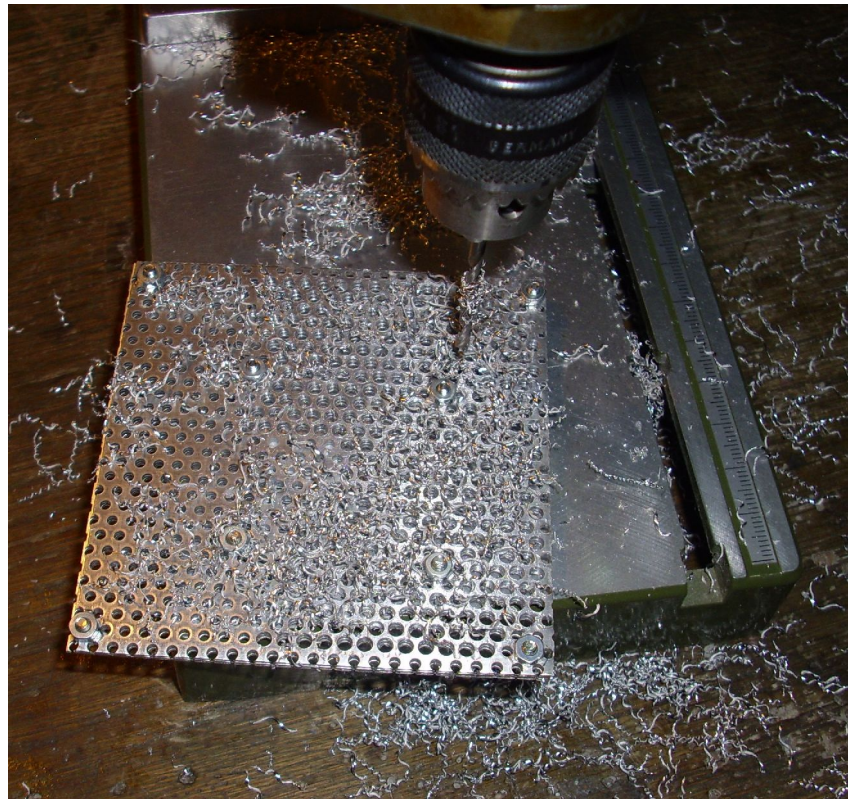
Dieser Wert ist - verglichen mit dem Fall des unter 1. diskutierten Lochbleches (mit **$d = 2,0\text{ mm}$** und **$h = 3,5\text{ mm}$**) - äußerst angenehm groß; allerdings zeigen sich auf einem Mitte 2021-07 gekauften Muster nach Lagerung in einem normal trockenen Wohnraum bereits Ende 2021-08 deutlich erste Rostflecken.

Abgesehen von 6. (Streckmetallblech) böte das oben unter 2. recherchierte Rundlochblech die größte Strahlendurchlässigkeit (mit **$d = 2,5\text{ mm}$** und **$h = 3,0\text{ mm}$** , und folglich **$n = 63,0\%$**). Allerdings konnte diese Ausführung noch nicht beschafft und damit in ihren angegebenen Daten verifiziert werden. Auch wurde die im Internet beschriebene Methode der chemischen Entfernung der Eloxalschicht noch nicht praktisch durchgeführt, und kann daher bisher weder bzgl. Effizienz noch bzgl. Praktikabilität bewertet werden. Diese Bewertung müsste in Relation gesetzt werden zu der Bewertung von Arbeitsaufwand und Ergebnis der Bearbeitung des oben unter 1. diskutierten Materials. Nach einiger Überlegung wurde dieser (letztgenannte) Weg (erfolgreich) beschritten.

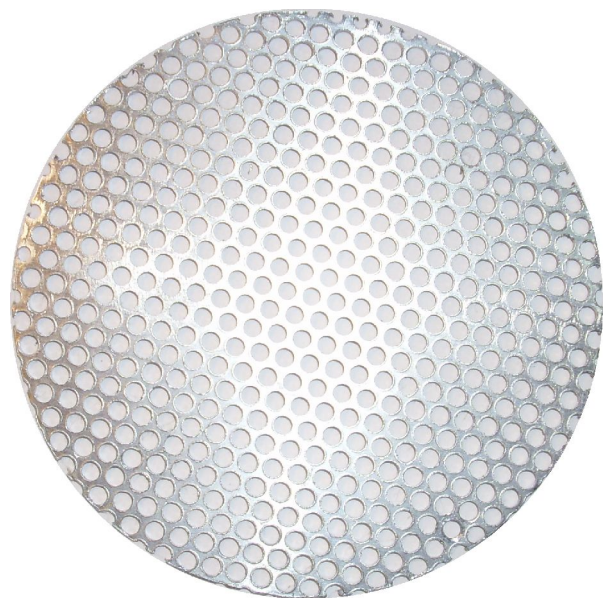
Wie oben diskutiert, beinhaltet diese Methode das Aufbohren sämtlicher Löcher eines Lochbleches auf hier **$2,7\text{ mm}$** , wobei nur jeweils **$0,8\text{ mm}$** Material bis zum nächstgelegenen Loch stehenbleiben, was je nach Bohrerindividuum zu erheblichen Verformungen des Werkstücks führen kann!

Um derartige, in der Praxis auftretende Nebeneffekte zu vermeiden, wurden zum Bohren drei Schichten des Lochblechs übereinandergelegt und miteinander verschraubt.

Des weiteren wurde der Bohrer beim Bohrvorgang großzügig mit Spiritus geschmiert, der sich durch die drei Lagen des Blechs und die Kleinheit der Löcher im Material ausreichend gut im Werkstück hielt. Im Ergebnis waren die aufgebohrten Löcher tatsächlich rund (was in so dünnem, weichen Blech durchaus nicht selbstverständlich ist!), und besaßen nur wenig Grat. Nach dem Anzeichnen der benötigten Umrisse auf den fertig gebohrten quadratischen Roh-



lingen reichte eine einfache Blechschere aus, um das grobe Außenmaß herzustellen. Die genaue Einpassung des kreisrunden Abdeckgitters in das erforderliche Dosenmaß wurde durch sukzessive Materialabnahme mit einfachen Feilen (normaler und feiner Hieb) anhand eines Dosenexemplars vorgenommen. Zu guter Letzt wurde der entstandene Grat durch beidseitiges Nassschleifen der Einzelbleche auf wasserfestem Schleifpapier entfernt.



#08. Die wichtigsten Strahlungs- und Dosisgrößen

Um Strahlenwirkungen vorherberechnen und vorher beschreiben zu können, ohne jedesmal erst Menschen dieser schädlichen (!) Strahlung aussetzen zu müssen, haben sich Praktiker und Strahlenphysiker über die Zeit seit der Entdeckung der Strahlungen (ab 1895) mit den Einzelheiten ihrer Eigenarten und Wirkungen auseinandersetzen müssen. Dabei hat sich seit dem Beginn dieser Versuche bei neuen Betrachtungen immer wieder gezeigt, dass das Strahlenrisiko bisher deutlich unterschätzt wurde. Die Begriffe zur Beschreibung der Strahlenwirkungen mussten daher immer wieder neu gefasst, neu definiert, in neuen, passenden Einheiten ausgedrückt, und neu durchdacht werden. Die heute **allerwichtigsten, grundlegenden Strahlungs- und Dosisgrößen** sind in der Tabelle zusammengestellt. (Insgesamt wurden bereits bis zu 100 Begriffe zur Beschreibung von Strahlenwirkungen definiert und benutzt, und die meisten von ihnen wieder fallen gelassen.)

Größe	Definition	Einheit
Aktivität A	Anzahl der Kernzerfälle je Sekunde	<i>Becquerel</i> $1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall} / \text{s}$
Ionendosis J	Die durch Strahlung in 1 kg Luft freigesetzte elektrische Ladung	<i>Coulomb / kg</i> $1 \text{ C} / \text{kg}$
Energiedosis D	Die durch Strahlung in 1 kg Materie abgegebene Energie	<i>Gray</i> $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / \text{kg}$
Äquivalentdosis H	Die mit der biologischen Wirksamkeit der Strahlenart bewertete Energiedosis. $H = W_R \cdot D$, mit W_R = Wichtungsfaktor für die Strahlenart nach StrlSchG und StrlSchV	<i>Sievert</i> $1 \text{ Sv} = W_R \cdot 1 \text{ Gy}$
Effektive Dosis E	Die Summe über die mit der biologischen Empfindlichkeit der bestrahlten Organe bewerteten Äquivalentdosen. $E = \Sigma (W_O \cdot H_O)$, mit W_O = Wichtungsfaktoren für die Organe nach StrlSchG und StrlSchV	<i>Sievert</i> 1 Sv

Während mit der Größe **Aktivität** eine der **Ursachen** oder Quellen für ionisierende Strahlung - nämlich der spontane radioaktive Zerfall - beschrieben wird, befassen sich die vier genannten Dosisgrößen mit dem Versuch der Beschreibung von **Wirkungen** der Strahlung auf (unbelebte und belebte) Materie. Nur anhand der Wirkungen der Strahlung kann diese gemessen, und - unter Berücksichtigung vieler weiterer Parameter - auch ihre Gefährlichkeit abgeschätzt werden.

Die auffälligste und historisch als erste erkannte und (zur Messung) benutzte Wirkung der ionisierenden Strahlung war die Wirkung der **Ionisation** (die auch dieser speziellen Strahlung den Namen gegeben hat).

Ionisierende Strahlung erzeugt in Materie elektrisch geladene Teilchen - eben Ionen, also elektrisch geladene Moleküle - Moleküle, aus deren Atomhülle (gegenüber dem elektrisch neutralen Zustand) entweder ein Elektron abgetrennt wurde, oder an deren Atomhülle sich ein zusätzliches Elektron angelagert hat. Am einfachsten lassen sich diese Vorgänge beobachten, wenn sie in Gasen erfolgen. Da Luft von der Natur weltweit als kostenlose, praktisch immer gleich zusammengesetzte Standard-Materie überall zur Verfügung stand und steht, hat man die **Ionendosis** in der oben beschriebenen Weise mit Hilfe von Luft definiert.

Auch heute noch messen praktisch alle Messgeräte die durch Strahlung erzeugten geladenen Teilchen, da die Messung der durch Strahlung in Materie eingebrachten Energie praktisch nicht möglich ist, denn sie ist sehr, sehr, sehr klein !

Letztlich wird ja alle absorbierte Energie - auch die Energie aus beliebigen Strahlungen - in Wärme umgesetzt. Der in der Definition der Energiedosis genannte Betrag von $1 \text{ Gray} = 1 \text{ Joule/kg}$ stellt für den Menschen bereits eine ganz erheblich schädigende Wirkung dar (5 Gy Ganzkörperdosis ist die Grenze, ab der Strahlung praktisch immer zum Tod führt). Wird die Energiedosis von 1 Gy in menschlicher Materie umgesetzt, so ist die davon verursachte Temperaturerhöhung (wenn die spezifische Wärmekapazität c_p des Menschen durch den Wert für Wasser angenähert wird):

$$\Delta T = \frac{E}{m \cdot c_p} = \frac{D}{c_p} \approx 0,00024 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{mit} \quad c_p = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \text{ (Wasser)}$$

Das menschliche Gewebe wird also durch die praktisch tödliche Strahlendosis gerade mal um rund 1/1000 °C erwärmt ! Zum Messen sogar dieser starken Strahlendosis, und erst recht zur Messung kleiner Strahlendosen im μGy - oder nGy -Bereich, ist der Begriff der Energiedosis ganz offensichtlich unbrauchbar. Auch zeigt die kleine Überschlagsrechnung, dass die Aufnahme von Energie in Form von ionisierender Strahlung eine äußerst ungesunde Energieaufnahme darstellt !

Viele Menschen kennen z.B. die wohltuende Wirkung der Bestrahlung des Kopfes mit einer Rot- und Infrarot-Lampe bei Erkältungen (verstopften Nasen-Nebenhöhlen), die die bestrahlten Bereiche durchaus um ein oder zwei Grad Celsius erwärmen mag. Mit Zuführung ionisierender Strahlung müsste man für die gleiche Erwärmung eine lokale (Kopf-) Dosis von 4000 Sv bis 8000 Sv verabreichen - ein Betrag, der das bestrahlte Gewebe sicher und vollständig nekrotisieren würde !

So wenig sich die Energiedosis für Messzwecke eignet, umso wichtiger ist sie als Grundlage für alle theoretischen Betrachtungen, sowie für alle auf dem Begriff der Energiedosis aufbauenden, weiteren Dosisbegriffe.

Messgeräte können also intern stets ausschließlich die Ionendosis messen, geben ihre Ergebnisse jedoch oft in den Einheiten *Gray* oder *Sievert* aus - d.h. sie tun nur so, als würden sie die Energiedosis (oder von dieser abgeleitete Dosisgrößen) messen ! Die Umrechnung ist allerdings im Allgemeinen nur mit Einschränkungen möglich, d.h. nur bei Einhaltung bestimmter äußerer Bedingungen - und für diese ist die messende Person verantwortlich ! Ein Benutzer, der der Anzeige eines Strahlungsmessgerätes blind vertraut, ohne einen Eindruck von der Funktion des Gerätes und der Grenzen dessen Aussagekraft zu haben, sollte tunlichst die Finger von diesem Gerät lassen, und auch keine Aussagen treffen - er könnte für diese zur Rechenschaft gezogen werden !

#09. Umrechnung von *Ionendosis* und *Energiedosis* für das Medium *Luft*

Grundlage für die Abschätzung des Ansprechvermögens (der "Empfindlichkeit") von Ionisationskammern ist die Definition der Ionendosis:

Die Ionendosis J (Einheit: As/kg) ist die durch ionisierende Strahlung in einer Masse von $m = 1\text{ kg}$ Luft freigesetzte elektrische Ladung Q (Einheit: As).

Luft besteht im wesentlichen aus

- 78,08 Vol-% Stickstoff (N_2)
- 20,95 Vol-% Sauerstoff (O_2)
- 0,93 Vol-% Argon (Ar)
- 0,04 Vol-% Kohlenstoffdioxid (CO_2)
- Wasserdampf (H_2O , enthält H_2) je nach Luftfeuchte

Die zum Abtrennen eines ersten Elektrons e (= einer Elementarladung) aus der Atomhülle erforderliche Energie W_{Ion} (Ionisierungsenergie) beträgt für den genannten Stoff:

- N = Atomarer Stickstoff (existiert nur theoretisch): ca. $14,5\text{ eV}$
- O = Atomarer Sauerstoff (existiert nur theoretisch): ca. $13,6\text{ eV}$
- N_2 = Molekularer Stickstoff: ca. $34,7\text{ eV}$
- O_2 = Molekularer Sauerstoff: ca. $31,1\text{ eV}$
- Ar = Argon: ca. $26,1\text{ eV}$
- H_2 = Molekularer Wasserstoff: ca. $36,3\text{ eV}$ (Zahlenwert besitzt hier nur Hinweischarakter)

- Luft = gewichteter Mittelwert aus allen Inhaltsstoffen: ca. 34 eV

Damit ist für das Standardmaterial *Luft* das *Verhältnis* aus der *für die Ionisation aufzuwendenden Energie* W zu der *bei der Ionisation erhaltenen elektrischen Ladung* Q gleich dem Verhältnis

$$\frac{W}{Q} = \frac{W_{Ion}}{e} = \frac{34\text{ eV}}{e} = 34\text{ V}$$

Dies ist auch (für Luft) das Verhältnis von *Energiedosis* $D = W/m$ zu *Ionendosis* $J = Q/m$:

$$\frac{D}{J} = \frac{\frac{W}{m}}{\frac{Q}{m}} = \frac{W}{Q} = \frac{W_{Ion}}{e} = \frac{34\text{ eV}}{e} = 34\text{ V}$$

und auch das Verhältnis von *Energiedosisleistung* $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$ zu *Ionendosisleistung* $\dot{J} = \frac{dJ}{dt}$:

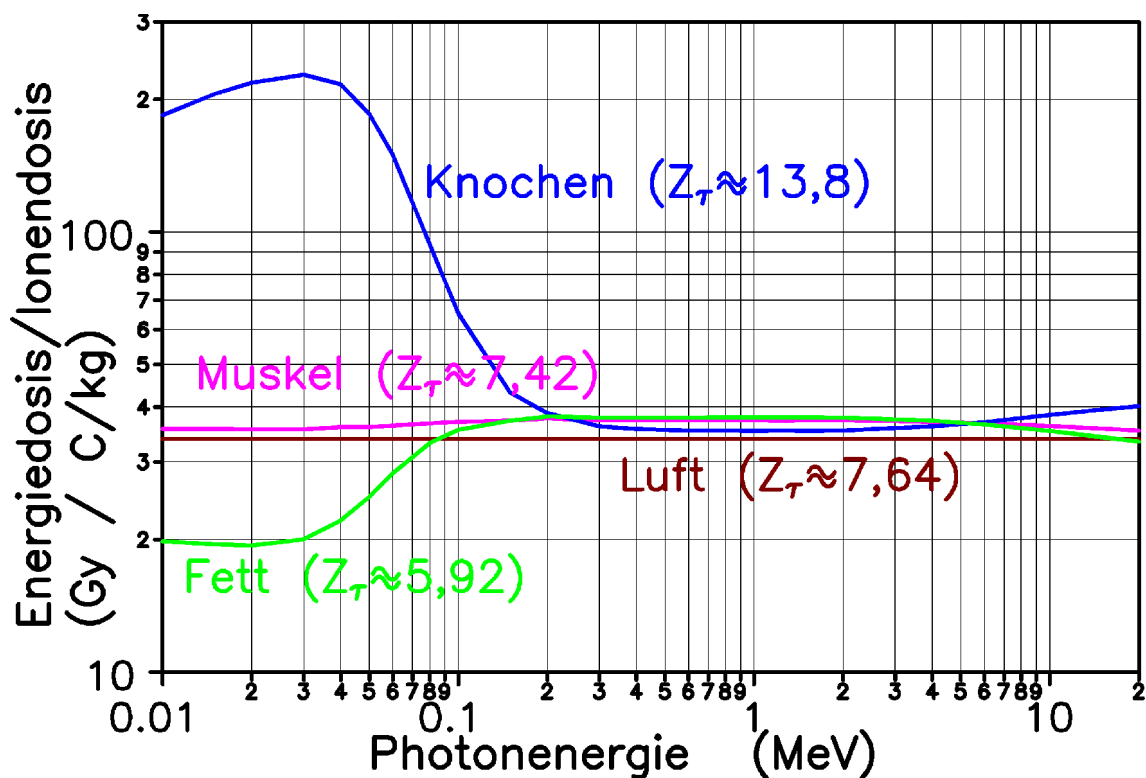
$$\frac{\dot{D}}{\dot{J}} = 34\text{ V} \quad \text{bzw.} \quad \dot{J} = \frac{\dot{D}}{34\text{ V}}$$

#10. Umrechnung von *Ionendosis* und *Energiedosis* für andere Substanzen als *Luft*

Die Umrechnung dieser Dosisgrößen ineinander ist für die meisten anderen Substanzen als Luft schwierig. Am einfachsten ist noch die Umrechnung für Wasser (und in guter Näherung auch für die weichen menschlichen Gewebe), was sehr verständlich ist, weil H_2O sich auf Molekülebene - abgesehen von der abweichenden Dichte - von O_2 für Strahleneffekte praktisch nicht unterscheidet.

Für andere Moleküle (aus Atomen mit höherer Kernladungszahl), und hierunter fallen beim Menschen in erster Linie die Knochen, besitzen die Umrechnungsfaktoren nicht nur andere Werte, sondern die Werte sind zusätzlich auch noch deutlich abhängig von der Strahlenenergie. Dies liegt an der Energieabhängigkeit der zugrundeliegenden Wechselwirkungseffekte von Photonenstrahlung mit Materie:

- τ = Photoeffekt
- σ = Comptoneffekt
- κ = Paarbildungseffekt



Die interne Umrechnung in Messgeräten von der gemessenen Ionisierung in die angezeigte Energiedosis ist also um so fehlerhafter, je mehr die bestrahlte Materie, für die die Dosis mit der Messung abgeschätzt werden sollte, vom Standardmaterial Luft (bzw. Wasser) abweicht !

Obwohl dieses grundlegende Problem bereits für den Menschen besteht, macht sich im praktischen Strahlenschutz darum kaum jemand Gedanken (was bedeutet, dass die höhere Knochendosis i.d.R. vernachlässigt wird, um überhaupt eine Aussage machen zu können).

Extrem groß werden diese systematischen Messabweichungen, wenn Strahlendosen in Materialien mit hoher Kernladungszahl (= Ordnungszahl) Z abgeschätzt werden sollen.

#11. Messbarkeit der natürlichen Umgebungsstrahlung mittels einfacher, luftgefüllter IOKs

Der Anteil der locker ionisierenden Strahlung (β - und γ -Strahlung) an der natürlichen Umgebungsstrahlung, wie er überall zu messen ist, liegt meist im Bereich von ca. $\pm 30\%$ um den "Daumen"wert von

$$\dot{D}_{Nat} = 100 \frac{nGy}{h}$$

herum. In Luft entspricht diese Energiedosisleistung einer Ionendosisleistung von

$$j_{Nat} = \frac{\dot{D}_{Nat}}{34 V} = \frac{100 nGy}{h \cdot 34 V} = \frac{10^{-7} J}{h \cdot 34 V \cdot kg} = \frac{10^{-7} V \cdot A \cdot s}{3600 s \cdot 34 V \cdot kg} \approx 0,817 \frac{pA}{kg}$$

In einem Messkammergelement (Modell *Erdnussdose*, vgl. #02) von z.B. $V = 0,0003804 m^3$ und $m = 0,000458 kg$ Luft wird damit bei vollständiger Aufsammlung aller freigesetzten Ladungen ein Strom fließen von

$$I_{Nat} = j_{Nat} \cdot m = 0,817 \frac{pA}{kg} \cdot 0,000458 kg \approx 3,742 \cdot 10^{-16} A.$$

Es erscheint als ein Ding der Unmöglichkeit, einen so kleinen Strom zuverlässig elektronisch zu messen.

Ein etwas größerer Messstrom könnte in einer Ionisationskammer mit größerem Volumen erzeugt werden, wie sie unter #03 angedacht wurde (IOK aus einem Abwasser-Kunststoffrohr von $d = 125 mm$ Innendurchmesser und $a = 0,5 m$ Länge (DN 125 nach DIN 19534 aus PVC-U) und der umschlossenen Luftmasse $m_{Luft} = 0,007388 kg$). Bei normal intensiver Umgebungsstrahlung könnte diese Kammer einen Ionisationsstrom sammeln von

$$I_{Nat} = j_{Nat} \cdot m = 0,817 \frac{pA}{kg} \cdot 0,007388 kg \approx 6,035 \cdot 10^{-15} A.$$

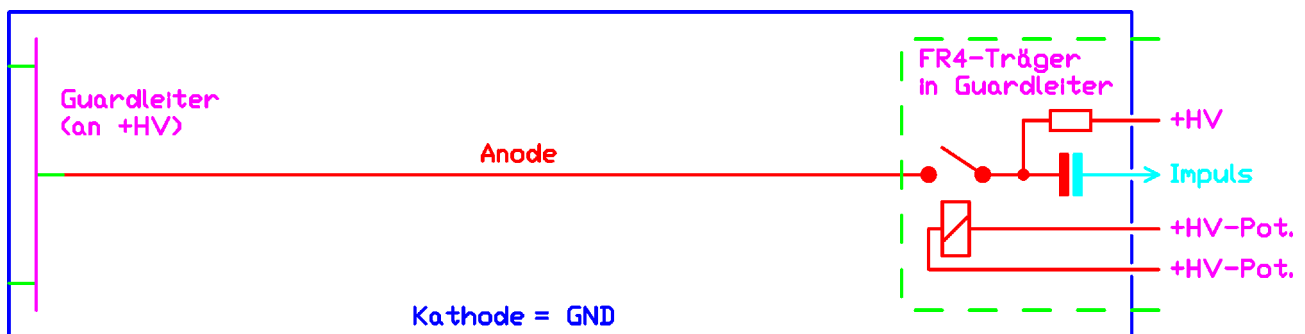
was für eine direkte, kontinuierliche elektronische Messung immer noch deutlich zu wenig ist.

Ein nicht-elektronisches Messverfahren bestand in den alten, im amtlichen Strahlenschutz heute nicht mehr zugelassenen Stabdosimetern in der Beobachtung der Ladungsabnahme durch die einfallende ionisierende Strahlung in einer vergleichsweise sehr kleinen Messkammer mittels eingebautem Elektrometer, dessen Anzeigefaden durch ein eingebautes Mikroskop abgelesen werden konnte. Auch angesichts der sehr, sehr kleinen Messkammer dieser alten Entwicklung wird deutlich, welches Ausmaß an Sorgfalt (Auswahl von Materialien mit extrem hoher elektrischer Isolation!) dieser Konzeption zugrunde gelegen haben muss !

In Analogie zu diesem Funktionsprinzip des Stabdosimeters könnte ein etwas indirektes elektronisches Messverfahren z.B. mit der unter #03 skizzierten PVC-Rohr-Konstruktion darin bestehen, die natürliche Entladung des höchst isoliert aufgehängten Innenleiters - nach definierter Aufladung

- durch die ionisierende Strahlung einfach geschehen zu lassen. Nur während der einige Millisekunden kurzen Nachladung würde anstelle der abfließenden Ladung **der gleich große Betrag der nachgelieferten Ladung** gemessen werden, die erforderlich ist, um den ladungssammelnden Leiter wieder auf den Spannungswert von vor der Entladung zu bringen. Eine solche zeitlich konzentrierte Messung wäre deutlich unkritischer als die direkte Messung der oben in diesem Kapitel berechneten aller kleinsten Entladeströme.

Der kurzzeitige Kontakt zum ladungsnachliefernden System könnte durch automatisiertes, kurzzeitiges Einschalten eines normalerweise höchstisolierenden Reed-Relais erfolgen. Der Spannungsabfall über diesen Reedkontakt kann dabei durch entsprechend häufige Betätigungsvorgänge des Reedkontakts (= Nachladungsvorgänge) klein gehalten werden, so dass über den offenen Kontakt ähnlich wie über eine Guard-Vorrichtung nur ein kleiner Strom fließt.



Jede Messung mit einer Ionisationskammer kann allerdings nur unter der Voraussetzung funktionieren, dass der Entladestrom vom ladungshaltenden Anodenleiter wirklich minimalst ist, verglichen mit dem oben abgeschätzten, erwarteten mittleren Ionisierungsstrom I_{Nat} . Dies bedeutet, dass der gesamte Isolationswiderstand bei einer auf $U_K = 100 \text{ V}$ aufgeladenen Kammer z.B. **zwei oder besser drei Größenordnungen größer** sein sollte als

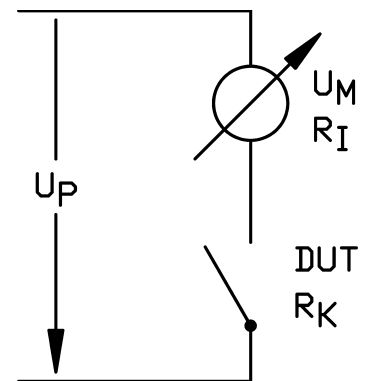
$$R = \frac{U_K}{I_{Nat}} \approx \frac{100 \text{ V}}{6,035 \cdot 10^{-15} \text{ A}} \approx 16570 \text{ T } \Omega \quad .$$

Derartig exotisch hohe Widerstände zwischen Kammerwand und Innenleiter könnten z.B. durch Aufhängung des Innenleiters an Polystyrol-Bauteilen mit elektrischer Guard-Einrichtung, oder an längeren Nylonfäden realisiert werden.

#12. Messung // Abschätzung des Isolationswiderstands eines Reedkontaktes

Der zu testende Reedkontakt R_K wird in einfacher Reihenschaltung mit einem handelsüblichen digitalen Vielfachinstrument mit Innenwiderstand $R_I = 10\text{ M}\Omega$ und hoher Auflösung von 4,5 Stellen an einer Prüfspannung von $U_P = 40\text{ V}$ betrieben (vgl. Skizze). Wenn der kleinste Spannungsmessbereich von $\pm 200,00\text{ mV}$ benutzt wird, ist der kleinste von Null abweichende Anzeigewert $U_{min} = 10\text{ }\mu\text{V}$. Der kleinstmöglich messbare, von Null abweichende Strom ist damit

$$I_{min} = \frac{U_{min}}{R_I} = \frac{10\text{ }\mu\text{V}}{10\text{ M}\Omega} = 1\text{ pA}$$



Wenn dieser Strom bei $U_P = 40\text{ V}$ fließt, beträgt der Isolationswiderstand des nicht geschlossenen Reedkontaktes also

$$R_K = \frac{U_P}{I_{min}} = 40\text{ T}\Omega$$

was in dieser elementaren Messschaltung der höchstmöglich abschätzbare Widerstand ist. Allgemein berechnet sich der Isolationswiderstand des Reedkontaktes in dieser Schaltung aus

$$R_K = \frac{U_P \cdot R_I}{U_M}$$

Bei derartig sensiblen Messungen neigt die Anzeige eines hochempfindlichen Digitalvoltmeters insbesondere an den niederwertigsten Stellen oft dazu, hin- und her zu springen; die Anzeigestabilität kann ggf. durch Parallelschalten eines Folienkondensators (z.B. $0,1\text{ }\mu\text{F}$) zum Instrument verbessert werden.

Bei Tests mehrerer Reedkontakte erwies sich die Sauberkeit derer Glaskörper als entscheidend; unbehandelt ergaben sich für R_K regelmäßig grob schwankende Phantasiewerte im Gigaohm-Bereich. Erst nach sorgfältiger Reinigung mit einem in Spiritus getränkten, sauberen Stück Fließpapier und anschließendem Abwarten der Lufttrocknung ergaben sich Werte von $R_K \geq 10^{13}\text{ }\Omega$.

#13. Wie stark schädigt uns die natürliche Umgebungsstrahlung?

Für diese grobe Abschätzung wird vereinfachend angenommen, dass

- die strahlenbedingte Schadenserzeugung im menschlichen Körper räumlich homogen erfolgt
- die Masse des menschlichen Körpers vollständig von gleichmäßig strahlenempfindlichen Zellen ausgefüllt wäre. Dies ist für Strahlengesichtspunkte nicht ganz so falsch, wie es sich zunächst anhört, denn auch Strahlentreffer (Energieumsetzungsereignisse), die im (real existierenden) Wasser in und zwischen den Zellen erfolgen, können die umgebenden nicht-wässrigen Zellbestandteile ebenso schädigen, als wenn die Energiefreisetzung direkt in diesen selbst erfolgt wäre (über den Umweg z.B. der im Wasser erzeugten freien Radikale).
- der Wichtungsfaktor für die Strahlenart W_R (nach StrlSchG und StrlSchV für Photonen- und β -Strahlung gleich 1; für α -Strahlung gleich 20) in der Weise berücksichtigt wird, als würde für α -Strahlung ebenfalls ein $W_R=1$ gelten und dafür die absorbierte Energie der α -Strahlung 20mal größer sein. Mit dieser Annahme kann also ohne besonderen Fehler der Zahlenwert für die natürliche Strahlenbelastung des Menschen in mSv (also die Äquivalentdosis) für die folgende Berechnung als umgesetzte Energiedosis (in mGy) benutzt werden.

Über die Zellenzahl des menschlichen Körpers gibt es viele leicht unterschiedliche Angaben; danach soll ein Erwachsener von $m = 70 \text{ kg}$ eine der folgenden Zahlen von Körperzellen besitzen:

- $z = 30.000.000.000.000 = 3 \cdot 10^{13}$ (= 30 Billionen)
- $z = \mathbf{50.000.000.000.000 = 5 \cdot 10^{13}}$ (= **50 Billionen**)
- $z = 70.000.000.000.000 = 7 \cdot 10^{13}$ (= 70 Billionen)
- $z = 100.000.000.000.000 = 1 \cdot 10^{14}$ (= 100 Billionen).

Von letzterer Zahl seien allein ca. 25% rote Blutkörperchen (die keinen Zellkern und damit keine DNA enthalten, was für diese Abschätzung - ebenso wie weitere Subtilitäten - unberücksichtigt bleibt). Für die Abschätzung unten wird hier der fett gesetzte Zahlenwert verwendet.

Die Strahlendosis D (Energiedosis) ist definiert als die in einem Massenelement deponierte Energie geteilt durch die Masse dieses Massenelements. Da wir den Menschen hier als homogen annehmen, gilt dieser Zusammenhang sowohl für den ganzen Menschen als auch für die einzelne Zelle:

$$D = \frac{E}{m} = \frac{E_{\text{Zelle}}}{m_{\text{Zelle}}} = \frac{E_{\text{Mensch}}}{m_{\text{Mensch}}}$$

Die minimale Energie für einen Treffer (ein Ionisierungsereignis) in einer Zelle wird hier mit ca. $E_{\text{Zelle}} = 60 \text{ eV}$ angenommen. Damit ist E_{Mensch} das Produkt aus diesem Energiebetrag und der Zahl der menschlichen Zellen z :

$$D = \frac{E_{\text{Mensch}}}{m_{\text{Mensch}}} = \frac{E_{\text{Zelle}} \cdot z}{m_{\text{Mensch}}} = \frac{60 \text{ eV} \cdot z}{70 \text{ kg}} = \frac{60 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 5 \cdot 10^{13}}{70 \text{ kg}} \approx 6,9 \text{ } \mu\text{Gy}$$

Dies ist etwa gleich der Dosis aus der natürlichen Umgebungsstrahlung, der wir in Mitteleuropa an einem Tag ausgesetzt sind; denn deren Dosisleistung beträgt ca. 2,5 mSv/a oder 6,85 $\mu\text{Sv}/\text{Tag}$!

Dies bedeutet:

Größenordnungsmäßig wird im Mittel *jede* der (angenommenen) **50.000.000.000.000 (= 50 Billionen)** Zellen unseres Körpers **einmal je Tag** durch ein Ionisierungsereignis aus der überall vorhandenen natürlichen Strahlenbelastung getroffen und (mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit - eine von hundert getroffenen Zellen ??? - eine von tausend getroffenen Zellen ???) auch davon geschädigt !

Überleben können wir offensichtlich nur, weil unser Immunsystem in aller Regel die erfolgten Schädigungen erkennt und repariert, und ggf. nicht mehr reparierbare Zellen abtötet und zur Ausscheidung bringt.

Wenn dies nicht ständig und automatisch und mit sehr hoher Zuverlässigkeit funktioniert, entsteht über kurz oder lang entweder ein latenter, vererbbarer Schaden, oder eine mglw. bösartige Erkrankung. Es handelt sich beim Erhalt unseres biologischen Wohlergehens also nicht um etwas Statisches, sondern um ein **höchst dynamisches Geschehen**; um ständige Reparaturen der laufend neu entstehenden Schäden; um ein äußerst subtiles Gleichgewicht zwischen permanent erfolgender Schädigung und (hoffentlich im Anschluss vorgenommener) zuverlässiger Reparatur.

Die Frage von Gesundheit oder schwerer Krankheit hängt damit ganz offensichtlich entscheidend von funktionierenden Schadenserkennungs- und -Reparatursystemen ab. Können diese die laufend neu geschädigt werdenden Zellen rechtzeitig erkennen und reparieren, und notfalls eliminieren ? (Und die Schädigung durch Ionisierende Strahlung stellt ja nur eine von vmtl. vielen möglichen Schädigungspfaden dar. (Es gibt z.B. auch Chemische Umweltbelastungen!))

Die Selbstheilungstätigkeit unseres Körpers hängt bekanntermaßen entscheidend u.a. von seiner momentanen Grundstimmung, insbesondere von der aktuellen Funktionsweise seines vegetativen Nervensystems ab. In Zeiten hoher Anspannung (Stress) schiebt der Körper Heilungsvorgänge tendenziell hinaus, um angesichts akuter Bedrohung alle Kräfte dafür einzusetzen, das praktische Überleben zu sichern (Sympathikotonie).

In früheren Jahrtausenden wehrte der Mensch so, wenn es nötig war, mit seinen bewährten Methoden Kampf (oder Flucht) akute Gefahren ab (oder wich ihnen erfolgreich aus), wobei ihm hohe Dosen körpereigenen Adrenalins halfen - wohingegen anschließende Ruhephasen ebenso wichtig waren, denn in diesen kümmerte sich der Körper um die Heilung der inzwischen aufgelaufenen Schäden (Wunden, Blutverlust, Zellschäden, usw.) und alles inzwischen versäumte (Nahrungssuche, Verdauung, psychischer Wiederaufbau, usw.).

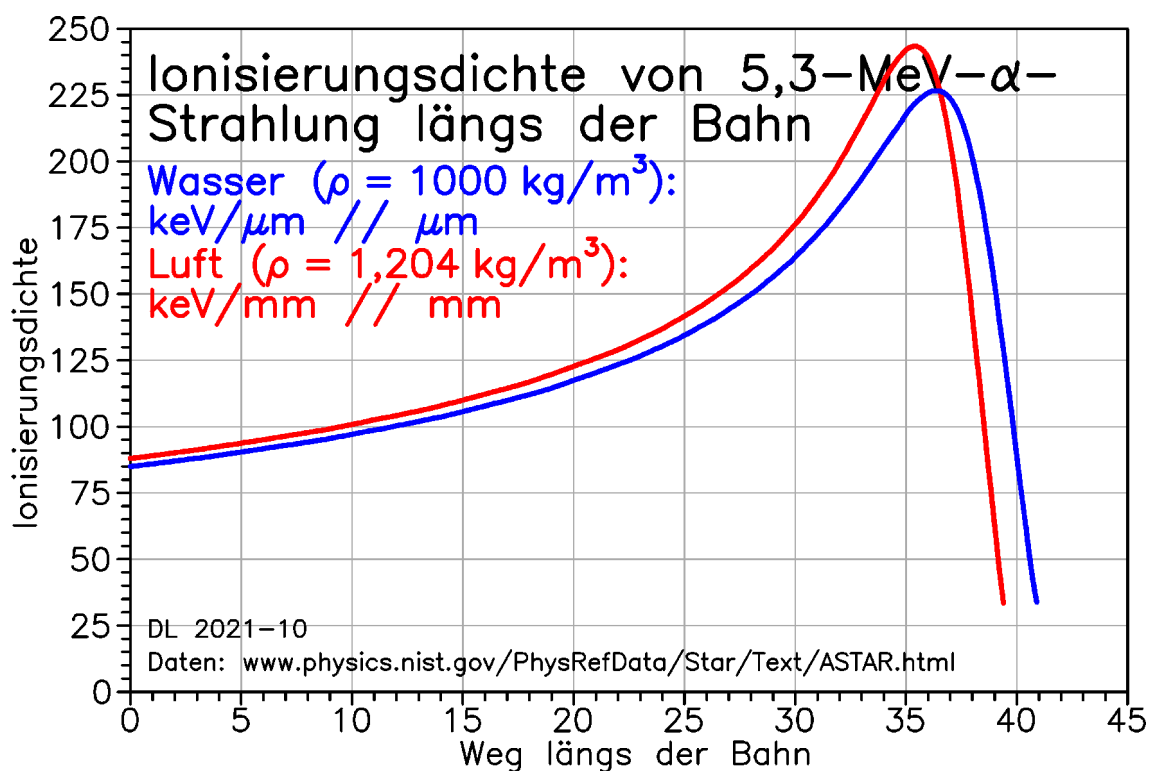
In heutigen Zeiten werden persönliche Bedrohungslagen dagegen oft als eher chronische Gefahren erlebt; das alltägliche Rattenrennen wird zu (auch innerer) Hektik, vielerlei äußere und innere Anforderungen von allen denkbaren Seiten wollen erfüllt werden, für uns selber bleibt keine Zeit; es gibt keine Ruhe mehr. Auch heute noch schiebt der Körper in solchen (Distress-) Zeiten alle nicht unmittelbar zum Überleben notwendigen Prozesse, wie eben innere Heilungsprozesse, auch solche zum Beheben der Zellschäden infolge chronischer ionisierender Strahlung, nach hinten.

Man kann sich leicht das Ausmaß biochemischer Katastrophen vorstellen, das durch derartige andauernde körperliche "Schieflagen", wie (zumindest als solchen erlebten) permanenten äußeren oder inneren Stress (incl. Phasen von Depression) ausgelöst werden mag, in der die Reparatursysteme des Körpers heruntergefahren sind.

#14. Ionisierungsvermögen von 5,3-MeV- α -Strahlung in Luft

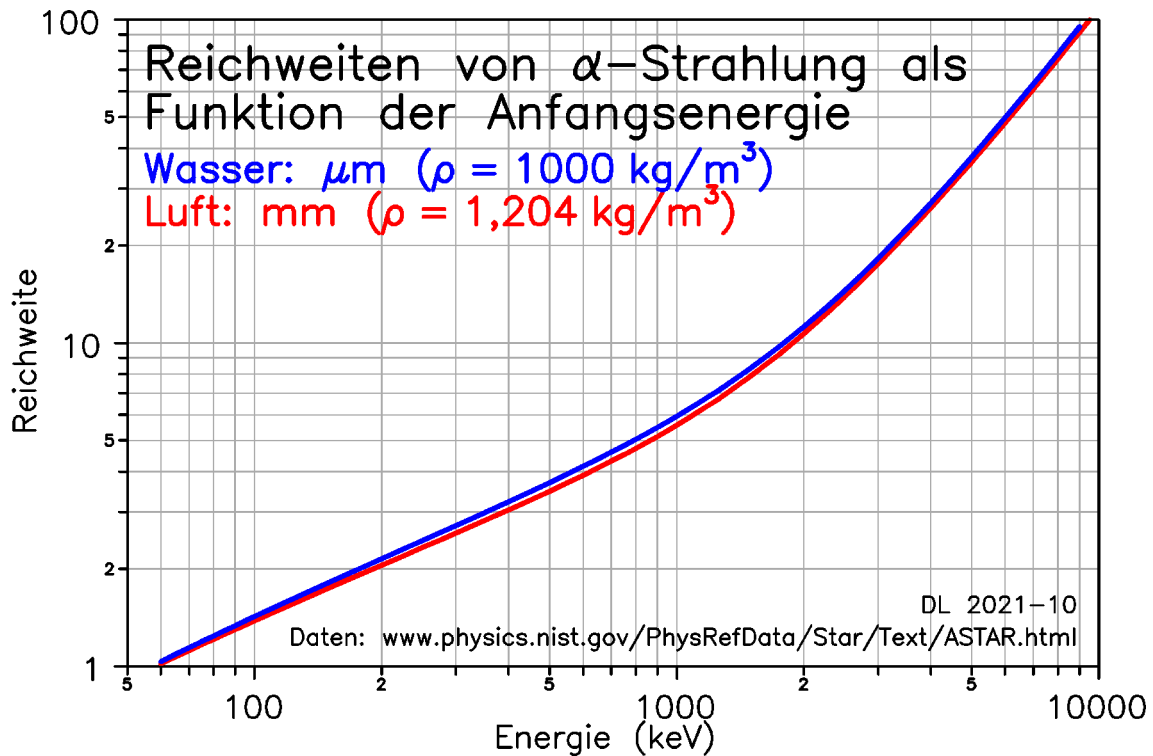
Alpha-Strahlung wird als **dicht ionisierende Strahlung** bezeichnet, weil sie eine hohe Ionisierungsdichte mit folglich (gegenüber den anderen Strahlungsarten) hoher Energiedeposition dE/dx längs der Bahn aufweist. Diese kommt u.a. zustande, weil α -Teilchen durch ihre hohe Masse (vier Kernbausteine) bei gegebener (kinetischer) Anfangsenergie eine vergleichsweise kleine Geschwindigkeit besitzen (sich z.B. mit $v \approx 15.900.000 \text{ m/s}$ bei $E = 5,3 \text{ MeV}$ noch deutlich unterhalb der Lichtgeschwindigkeit bewegen). Beim Durchqueren von Materie halten sich die Strahlungsteilchen folglich "lange" im Bereich einzelner Atome auf, und je länger diese Zeit am Bahnende wird, um so höher ist die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit (mit Energieabgabe an die Materie).

Die Aufenthaltszeit im Bereich der Atome ist jedoch unter mehreren Effekten nur der *am anschaulichsten verstehbare Teil* der zum Brems- bzw. Ionisierungsvermögen beitragenden Einflüsse. Die vollständige Berechnung ist einigermaßen komplex, so dass es heute am einfachsten ist, sich Tabellen mit den gewünschten Daten (wie z.B. die hier zunächst diskutierte Ionisierungsdichte als Funktion der momentanen Teilchenenergie) von kompetenten Institutionen aus dem Internet herunterzuladen. Zur Erstellung der hier gezeigten Grafiken wurden Daten aus dem NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) verwendet.



Die Grafik zeigt die Ionisierungsdichten (Beträge sind mit dem Bremsvermögen identisch) für α -Strahlung der genannten Anfangsenergie in Luft bei Normaldruck ($p = 101325 \text{ Pa}$) und (europäischer) Zimmertemperatur ($\theta = 20^\circ \text{C}$), sowie für Wasser (Bragg-Kurven). Die Kurvenmaxima sind etwa dreimal so hoch wie die Werte bei Start des Teilchens mit voller Anfangsenergie. Damit ist es von der jeweiligen Fragestellung abhängig, ob es für eine Abschätzung ausreicht, mit der jeweiligen mittleren Energieabgabe über die gesamte Bahn ($= E_0 / R$ mit E_0 = Anfangsenergie und R = Reichweite) zu rechnen, oder ob die Berücksichtigung des Kurvenverlaufs erforderlich ist.

Zur Abschätzung der Reichweite R von α -Strahlung existiert eine Anzahl veröffentlichter Überschlagsformeln sowie Diagrammen, die sich zum Teil jedoch widersprechen. Daher wurde die nachfolgende Grafik ebenfalls aus beim NIST erhältlichen Daten erzeugt. Die genauen Reichweiten, speziell bei der im folgenden diskutierten Anfangsenergie $E = 5,3 \text{ MeV}$, betragen $R_L = 39,62 \text{ mm}$ in Luft bzw. $R_W = 41,05 \text{ }\mu\text{m}$ in Wasser.



Die Darstellung von Teilchen mit der Anfangsenergie $E_0 = 5,3 \text{ MeV}$ wurde gewählt, weil es sich einerseits bei rund 5 MeV um einen typischen Betrag handelt, wie er bei vielen α -Kernzerfällen auftritt. Außerdem handelt es sich bei dieser charakteristischen Energie um die beim Zerfall des Nuklids *Polonium-210* freiwerdende Energie, und dieses steht im Mittelpunkt der nachfolgenden Betrachtung.

#15. Abschätzung der Nachweisbarkeit von mit Po-210 vergiftetem Tee mit dem LKD

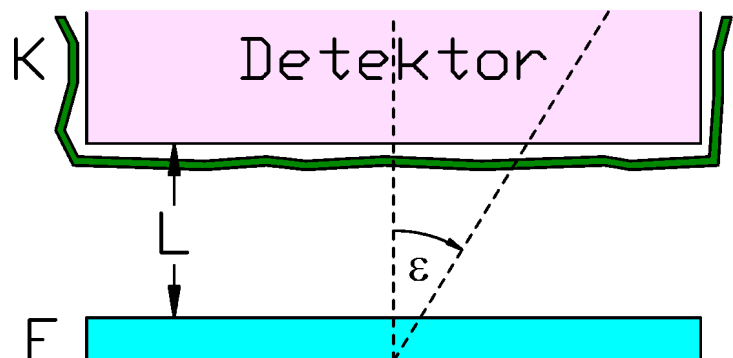
Die mögliche Brauchbarkeit des Luftoffenen Kontaminationsdetektors (LKD) soll anhand der öffentlich zugänglichen Daten zu einem Fall von Vergiftung mit einem radioaktiven α -Strahler abgeschätzt werden:

Zusammenstellung der Daten von Po-210:	
Material:	Silberfarbenes Schwermetall
Dichte:	$\rho \approx 9120 \text{ kg/m}^3$
Herstellung:	natürlich: Uran-238 - Zerfallsreihe künstlich: $\text{Bi-209} + n \rightarrow \text{Bi-210}$ (Neutronenaktivierung) $\text{Bi-210} (t_{1/2} = 5,013 \text{ d}) \rightarrow \beta^- + \text{Po-210}$
Physikalischer Zerfall:	Po-210 ($t_{1/2} = 138 \text{ d}$) $\rightarrow \alpha (5,3 \text{ MeV}) + \text{Pb-206}$ (stabil) (Praktisch ausschließliche Emission von α -Strahlung)
Spezifische Aktivität:	$A/m = 1,67 \cdot 10^{17} \text{ Bq/kg}$ $1 \mu\text{g} \leftrightarrow 167 \text{ MBq}$
Reichweite der α -Strahlung:	$\approx 39,6 \text{ mm}$ in Luft, $\approx 41 \mu\text{m}$ in Wasser
Aufnahme per Ingestion:	Einbau von $\approx 10\%$ in Milz, Leber, Nieren - restliche $\approx 90\%$ werden nicht vom menschl. Körper übernommen
Abnahme nach Ingestion:	$t_{1/2} \approx 50 \text{ d}$ (Biologische Halbwertszeit) $t_{1/2} \approx 37 \text{ d}$ (Effektive Halbwertszeit)
Dosisfaktor bei Ingestion:	ca. $200 \text{ Sv} / 1 \mu\text{g}$ aufgenommenes Po-210
Letale Dosis:	einige Sv
Daten zum Giftanschlag auf Alexander Litwinenko († 23.11.2006). Vgl. https://uol.de/physik/forschung/ehemalige/uwa/rad/po-210 (DL 2021-09-15)	

Wie bei allen vergleichbaren Strahlern kann nur ein kleiner Anteil der in einem homogenen wässrigen Flüssigkeitsvolumen freigesetzten α -Strahlung aus der Oberfläche austreten, da ihr Großteil aufgrund ihrer kurzen Reichweite im Volumen selbst absorbiert wird. Wenn der Detektor Strahlung bis zu einem Austrittswinkel $\pm\delta$ wahrnehmen kann, muss (vgl. #06) von einem mittleren Austrittswinkel von $\varepsilon = \arccos((1+\cos \delta)/2)$ ausgegangen werden. Auf dem folglich im Mittel "schrägen", d.h. nicht-senkrechten Durchgang, durch

- die oberste Flüssigkeitsschicht F ■
- die Luft bis zum Detektor L □
- die Kunststoffolie K ■, welche kondensierende Feuchte im Detektorvolumen verhindert

gibt das Strahlungsteilchen bereits einen erheblichen Teil seiner Energie ab. Nur die dem Strahlungsteilchen verbliebene Restenergie kann danach im Detektor noch Luftionen freisetzen, die dort als elektrischer Strom gemessen werden.



Als feuchtesperrende Kunststoffolie zum Detektorüberzug kommt in erster Linie einfache PE-Haushalts-Klarsichtfolie (Frischhaltefolie, Adhäsionsfolie) in Betracht. Eine eigene Messung, sowie die ersten zwei Seiten einer einfachen Internetsuche (Frischhaltefolie Dicke) ergaben (2021-10-09) neben vielen unsinnigen Seiten die folgenden Angaben von Foliendicken:

1. $d = 8,4 \mu m$ (eigene Messung, vgl. #05, offenbar mit "eingewickelter Luft")
2. $d = 13,6 \mu m$
3. $d = 7,5 \mu m \dots 9,5 \mu m$
4. $d = 10 \mu m \dots 13 \mu m$
5. $d = 10 \mu m$
6. $d = 11 \mu m$
7. $d = 10 \mu m$
8. $d = 10 \mu m$
9. $d = 13,4 \mu m$

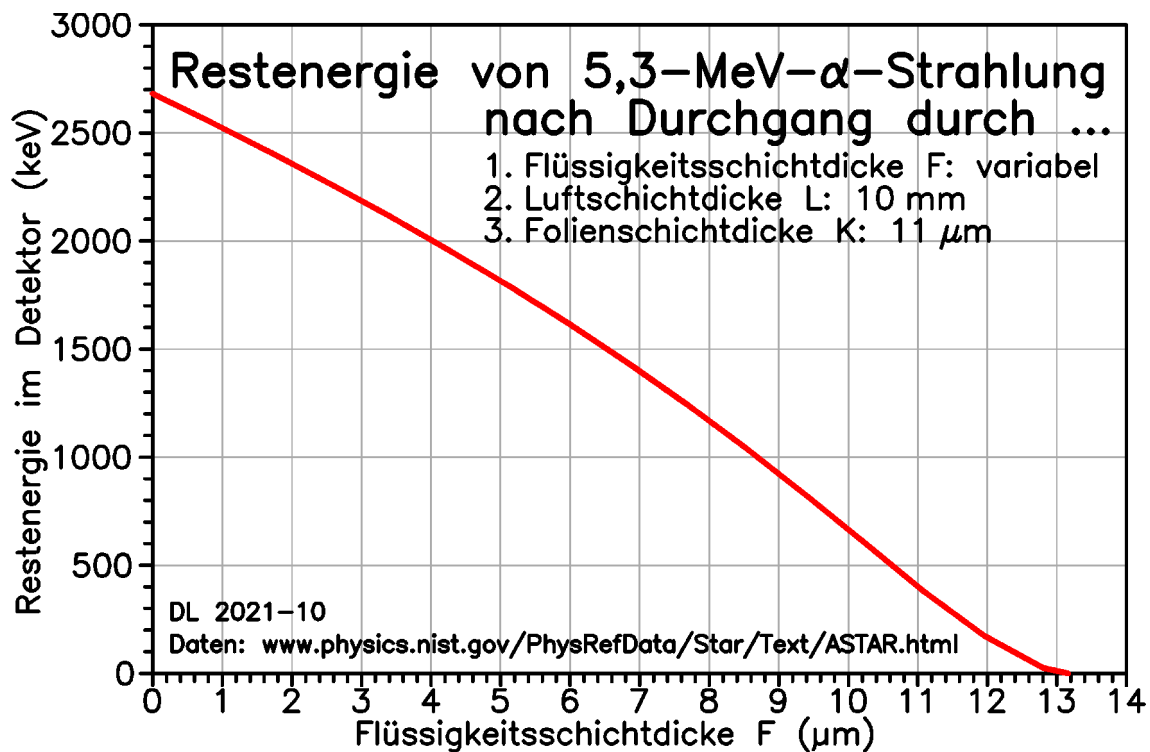
Entweder scheint es unter den Angeboten also bis zu drei unterschiedliche Ausführungen von Klarsichtfolie zu geben, oder aber die Anbieter sind sich selber über ihr Produkt nicht besonders sicher (was beides durchaus sein kann). Der Mittelwert über die Dickenangaben beträgt $10,711 \mu m$, so dass $K \approx 11 \mu m$ angenommen wird. Geteilt durch $\cos(\varepsilon)$ mit $\varepsilon = 31,4^\circ$ (vgl. #06) ergeben sich als Folienwegstrecke $XK \approx 13 \mu m$ (mit dem angenommenen Bremsvermögen von Wasser).

Die hier angesetzte Detektorabstand $L = 10 mm$ ergibt analog als Luftwegstrecke $XL \approx 12 mm$.

Unter Berücksichtigung dieser Wirkungen von Luftschicht und Kunststoffolie wird aus dem bereits unter #14 verwendeten numerischen Datensatz nun der Betrag der im Detektor deponierten Restenergie E als Funktion der Flüssigkeitswegstrecke XF berechnet (hier der Pseudocode):

- $E_0 := 5,3 MeV$, $E := E_0$; $XF := 0 \dots$ // Anfangsbedingungen
- So lange ($E > 0$): // Gesamtabbruchkriterium: $E \leq 0$ (in vorh. Durchlauf)
 - $E := E_0$; // Start der Rechnung bei neuer Flüssigkeitsschichtdicke
 - for 1 to XF do // XF = aktuelle Flüssigkeitswegstrecke (0 ... ?)
 - $\Delta E = f(\text{Wasser}, E, 1 \mu m)$; //
 - $E := E - \Delta E$ //
 - for 1 to 12 do // $XL \approx 12 mm$ Luftwegstrecke
 - $\Delta E = f(\text{Luft}, E, 1 mm)$; //
 - $E := E - \Delta E$ //
 - for 1 to 13 do // $XK \approx 13 \mu m$ Folienwegstrecke
 - $\Delta E = f(\text{Wasser}, E, 1 \mu m)$; //
 - $E := E - \Delta E$ //
 - Ausgabe ($XF \cdot \cos(\varepsilon) \# E$) // Ausgabe: (Flüssigkeitsschichtdicke # Restenergie)
 - $XF := XF + 1 \dots$ // Nächstgrößere Flüssigkeitswegstrecke XF in μm

Zuletzt kann dann noch numerisch über die erhaltene Funktion integriert werden, um das Gesamt-Ansprechvermögen für den Detektor in dieser Anwendung, d.h. aus der Oberfläche einer wässrigen Flüssigkeit zu erhalten.



Selbst wenn in der Flüssigkeit keine Strahlungsabsorption stattfindet (d.h. falls die Strahlungsemission direkt an der Oberfläche passiert), wird die Strahlung im Mittel danach also gerade mal die Hälfte der Zerfallsenergie (lt. Grafik $\approx 2700 \text{ keV}$) im empfindlichen Volumen des Detektors deponieren. (Dies liegt an der abschwächenden Wirkung von Luft- und Folienschicht.) Mit zunehmender Tiefe des Zerfalls in der Flüssigkeitsschicht führt die dortige Selbstabsorption schon ab $F \approx 13 \mu\text{m}$ dazu, dass das Strahlungsteilchen bei Eintritt in den Detektor seine gesamte Ionisierungsfähigkeit verloren hat.

Das Integral unter der hier dargestellten Kurve der Restenergie beträgt $\approx 23,1 \text{ MeV} \cdot \mu\text{m}$. Im Detektor wird also im Mittel eine Ionisierungsenergie deponiert, wie sie aus einer Flüssigkeitsschichtdicke von

$$d = \frac{23,1 \text{ MeV} \cdot \mu\text{m}}{5,3 \text{ MeV}} = 4,36 \mu\text{m}$$

emittiert würde, wenn auf dem gesamten Weg vom Zerfallsort bis in den Detektor keinerlei Energieverlust stattfände. Unter Benutzung dieser fiktiven Schichtdicke kann nun aus der spezifischen Aktivität eines wässrigen Volumenstrahlers auf die zu erwartende Energiedeposition in der Messkammer, und damit auf den resultierenden Kammerstrom geschlossen werden.

Anwendungsbeispiel:

Für den Luftoffenen Kontaminationsdetektor (LKD, Version 1) mit der empfindlichen Detektorfläche A_{Det} wurde als Grenze der Nachweisbarkeit eine Kontamination von $K = 4,51 \text{ Bq/cm}^2$ abgeschätzt***. Eine wässrige Aktivität der hier berechneten Schichtdicke $d = 4,36 \mu\text{m}$ müsste folglich an der Grenze der Nachweisbarkeit die spezifische Aktivität aufweisen von

$$\frac{A}{m} = \frac{K \cdot A_{Det}}{A_{Det} \cdot d \cdot \rho} = \frac{K}{d \cdot \rho} = \frac{4,51 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot 0,000436 \text{ cm} \cdot 1 \text{ g}} = 10344 \frac{\text{Bq}}{\text{g}} \approx 10 \frac{\text{MBq}}{\text{kg}} \approx 1 \frac{\text{MBq}}{\text{Tasse}}$$

Ein solcher Po-210-Anteil von ca. 1 MBq je (Tee-)Tasse läge mit dem selbstgebastelten LKD also gerade an der Grenze der Nachweisbarkeit. Wie aus den oben zitierten, von der ehemaligen Arbeitsgruppe Physikalische Umweltanalytik an der Universität Oldenburg zusammengetragenen Daten geschlossen werden kann, würde das Trinken dieser Tasse mit 100 ml Tee eine Effektive Dosis von $E \approx 1,2 \text{ Sv}$ erzeugen - dies ist eine Dosis, die zwar noch nicht direkt letal, aber doch alles andere als unerheblich ist (sie kann bereits akute Strahlenschäden auslösen). Im Falle des Ansprechens des LKD wäre auf jeden Fall - selbst bei massivstem Durst - schon von einer ersten Tasse derartig "gewürzten" Tees, und allerspätestens vom Genuss einer zweiten oder gar dritten Tasse dringendst abzuraten!

Es wäre also - zumindest nach den derzeit vorliegenden Erkenntnissen - unverantwortlich, die in diesen Papieren diskutierte Erdnussdosen-Bastellösung (LKD-LuftoffenerKontaminationsDetektor) als hinreichend warnenden Schutz vor gewissen bösartigen Angriffen auf Leben und Gesundheit darstellen zu wollen - wer Bedarf für solche Geräte hat, sollte sich besser nur auf gut eingeführte und erprobte Technologien verlassen!

*** Goedecke, Rolf: LKD - Ein luftoffener Kontaminationsdetektor. Arbeitspapier, 2024-08-31.

#16. Die Thorium-Zerfallsreihe und der Nachweis ihrer Aktivität mit dem LKD

Die nachstehende Grafik zeigt den Auszug aus einer Nuklidkarte, soweit die Nuklide aus der natürlichen Thorium-Zerfallsreihe betroffen sind. ***

Das natürlicherweise in der Erdkruste vorhandene Nuklid Th-232 ist das namensgebende Mutter-nuklid dieser Reihe. Es ist so langlebig, dass seine Zerfallsrate in einem gegebenen Präparat - nach menschlichen Maßstäben - als ewig konstant angesehen werden kann. Die Abtrennung von Thorium aus Thorium-haltigem Gesteinsmaterial ergibt zunächst ein reines Gemisch aus genau 50 % Th-232 und 50 % Th-228 (da chemische Trennungsgänge nicht nuklidspezifisch wirken). In diesem frisch abgetrennten, natürlichem Thorium nimmt anschließend die Aktivität des Th-228 ab, da dieses nur in dem Ausmaß nachproduziert wird, in dem sich die Aktivität seines Mutternuklids Ra-228 wieder aufgebaut hat. Nach Abwarten von z.B. 5 Halbwertszeiten, also nach z.B. 28,5 Jahren, ist die Aktivität des Ra-228 ungefähr wieder so hoch wie vor der chemischen Abtrennung, und die entstandene Störung im Gleichgewicht der gezeigten Zerfallsreihe ist im wesentlichen wieder behoben. Dies dürfte heute für praktisch alle noch vorhandenen Thorium-haltigen Glühstrümpfe der Fall sein, da diese schon seit längerem nicht mehr gehandelt und daher nicht mehr neu produziert werden.

Die wichtigsten Zerfallseigenschaften des Mutternuklids und der Zwischenprodukte in dieser natürlichen Zerfallsreihe sind:

Th-232 = Thorium-232
 α -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 14.000.000.000$ a

Ra-228 = Radium-228
 β -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 5,7$ a

Ac-228 = Actinium-228
 β -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 6,13$ h

Th-228 = Thorium-228
 α -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 1,9$ a

Ra-224 = Radium-224
 α -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 3,64$ d

Rn-220 = Radon-220
 α -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 55,6$ s

Po-216 = Polonium-216
 α -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 0,15$ s

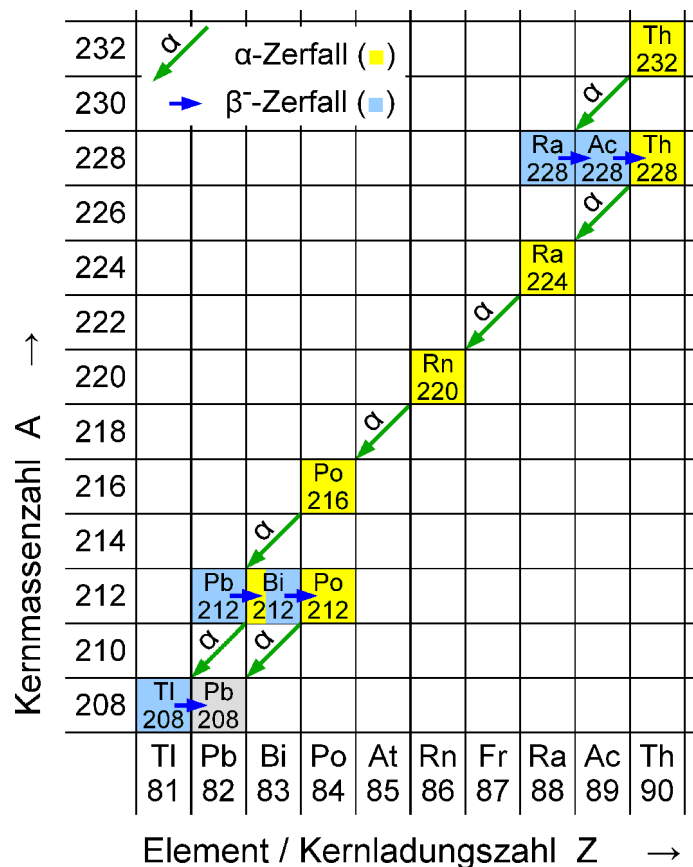
Pb-212 = Blei-212
 β -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 10,6$ h

Bi-212 = Bismut-212
 α -Zerfall (36,2 %) β -Zerfall (63,8 %) $t_{1/2} \approx 60,6$ min

Po-212 = Polonium-212
 α -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 0,3$ μ s

Tl-208 = Thallium-208
 β -Zerfall (100 %) $t_{1/2} \approx 3,1$ min

Pb-208 = Blei-208 ist stabil, und stellt damit das Endprodukt der Th-232-Zerfallsreihe dar.



Die Aufteilung der Zerfallswege durch das Bi-212 ist für das Ansprechverhalten des LKD unwichtig, weil der LKD nur α -Strahlung misst. Für ihn sehen beide Zerfallswege des Bi-212 wie nur ein gemeinsamer aus.

Vom Th-232 bis incl. zum Ra-224 kann also angenommen werden, dass alle diese Nuklide der Zerfallskette im Gleichgewicht sind (d.h. sie sind in jeweils gleicher Aktivität vorhanden). Es handelt sich chemisch-physikalisch ausschließlich um Festkörper, deren α -Strahlung im wesentlichen im Material selbst absorbiert wird (und der noch aus dem Material austretende α -Strahlungsanteil eine Reichweite von höchstens ca. 5 cm besitzen kann).

Das Folgeprodukt Rn-220 ist jedoch ein Edelgas, das aufgrund seiner fehlenden chemischen Bindungsfähigkeit aus dem Material des Glühstrumpfs ausgast, sich ggf. im Volumen der Messkammer verteilt, und dort ebenso wie sein sehr schnell weiter zerfallendes Tochternuklid Po-216 ($t_{1/2} = 0,15$ s) seine vom LKD messbare α -Strahlung abgibt. Die Zerfälle des Rn-220, sowie die praktisch zeitgleichen Zerfälle dessen Tochternuklids Po-216, werden im LKD nachgewiesen, und zeigen sich darin anhand ihrer gemeinsamen Abklingzeit von $t_{1/2} \approx 55,6$ s.

Bei jedem α -Zerfall des Po-216 entsteht ein Atom von dessen Tochteruklid Pb-212. Dieses ist ein β -Strahler, der (im Messkammer-Output nicht sichtbar) mit $t_{1/2} \approx 10,6$ h zu Bi-212 zerfällt. Letzteres zerfällt mit $t_{1/2} \approx 60,6$ min letztlich (über eines von zwei hier nicht interessierende, kurzlebige Zwischenprodukte) weiter unter Aussendung von α -Strahlung zum stabilen Endprodukt Pb-208.

Das Pb-212 sowie auch alle dessen Folgeprodukte sind wieder Feststoffe, die sich in der Kammer befinden und (summa summarum) wie beschrieben für einen weiteren α -Zerfall verantwortlich sind; allerdings baut sich deren Aktivität in der Messkammer ja erst - langsam - mit der Zeit durch die Zerfälle des Rn-220 auf. Die aufgebauten Folgeprodukte befinden sich zu unbekannten Anteilen sowohl im Gasraum der Messkammer, werden sich aber auch an deren Wänden angelagert haben, so dass mit dem Öffnen der Messkammer und dem Entweichen des Rn-220 noch ein Anteil Pb-212 (und Folgeprodukte) verblieben sein wird, der mit etwas mehr als der Halbwertszeit des Pb-212 von $t_{1/2} \approx 10,6$ h zerfallen muss (leicht verlängerte Halbwertszeit, weil die Zerfälle durch den α -Zerfall des Bi-212 etwas verzögert werden).

Die restliche, an den Kammerwänden im LKD (jedoch nicht im Probenraum!) angelagerte Aktivität des Pb-212 nimmt also ungefähr mit dessen charakteristischer Halbwertszeit ab (und wird, da α -Strahlung emittiert wird, auch vom LKD nachgewiesen). Sofern dieser Restbetrag an Aktivität nach einem Glühstrumpf-Experiment stört, hilft nur einfaches Abwarten, bis der Kammerstrom nach gut zwei Tagen wieder ganz auf seinen Nullwert abgefallen ist.

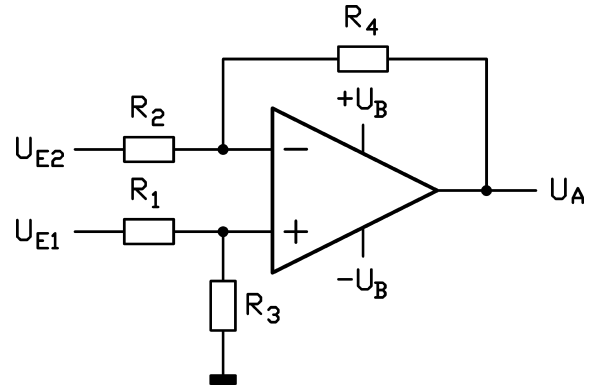
*** Daten zum Nuklidzerfall aus:

Seelmann-Eggebert, W.; Pfennig, G.; Münzel, H.: Nuklidkarte. 4. Auflage 1974.

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe, Institut für Radiochemie. Verlag Gersbach u. Sohn. ISBN 3-87253-084-4.

#17. Schaltungsberechnung: Differenzverstärker

Für den Entwurf der Schaltung des LKD#02 (Luftoffener Kontaminationsdetektor, Version 02) wird hier die klassische Schaltungsanalyse dieser Baugruppe (unter der Annahme der Verwendung eines idealen Operationsverstärkers) durchgeführt. Im LKD#02 wird mit diesem Schaltungselement außer der Differenzbildung aus den beiden Eingangsspannungen auch die Aufgabe der Pegelwandlung durchgeführt, denn bei geeigneter Dimensionierung des Spannungsteilers aus R_1 und R_3 dürfen die Eingangsspannungen U_{E1} und U_{E2} bei diesem Design auch außerhalb des durch $+U_B$ und $-U_B$ aufgespannten Bereichs der OP-Betriebsspannung liegen.



Die Spannung am Nichtinvertierenden Eingang (n) bzw. (+) des OP-Verstärkers gibt die Spannung am Invertierenden Eingang (i) bzw. (-) vor. Das Potential des Ersteren wird von U_{E1} und der Spannungsteilerschaltung aus R_1 und R_3 bestimmt. Da der Strom I_n gleich Null ist, ergibt sich U_n damit ganz einfach zu:

$$U_n = U_i = U_{E1} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

Für die durch R_2, R_4 in den Summierpunkt fließenden Ströme I_2, I_4 gilt $I_2 + I_4 = 0$, womit:

$$\frac{U_{E2} - U_i}{R_2} + \frac{U_A - U_i}{R_4} = 0 \quad \text{woraus folgt:}$$

$$\frac{U_A}{R_4} = U_i \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) - \frac{U_{E2}}{R_2} \quad \text{bzw.} \quad U_A = U_i \cdot \left(\frac{R_4}{R_2} + 1 \right) - \frac{R_4}{R_2} \cdot U_{E2}$$

und das **allgemein gültige Ergebnis** folgt nach Einsetzen von $U_n = U_i$ (s.o.):

$$U_A = \frac{R_3 \cdot (R_2 + R_4)}{(R_1 + R_3) \cdot R_2} \cdot U_{E1} - \frac{R_4}{R_2} \cdot U_{E2}$$

Einfach und übersichtlich wird die Schaltung aber erst, wenn **die beiden Brüche gleich** sind:

$$\frac{R_3 \cdot (R_2 + R_4)}{(R_1 + R_3) \cdot R_2} = \frac{R_4}{R_2} \quad \text{was folgt wenn} \quad R_2 \cdot R_3 \cdot (R_2 + R_4) = R_4 \cdot (R_1 + R_3) \cdot R_2$$

$$R_3 \cdot (R_2 + R_4) = R_4 \cdot (R_1 + R_3) \quad \text{bzw.} \quad R_3 \cdot R_2 + R_3 \cdot R_4 = R_4 \cdot R_1 + R_4 \cdot R_3$$

$$R_3 \cdot R_2 = R_4 \cdot R_1 \quad \text{oder} \quad \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} \quad .$$

Mit dieser Dimensionierung erfüllt die Schaltung die **Funktion eines Differenzverstärkers**:

$$U_A = \frac{R_4}{R_2} \cdot (U_{E1} - U_{E2}) \quad .$$

Häufig wählt man zusätzlich auch $R_1 = R_2$ und $R_3 = R_4$ und kann so Widerstände aus denselben Herstellungschargen (mit identischen Temperaturkoeffizienten etc.) verwenden. Die Möglichkeit dieses Sonderfalls wird im LKD#02 nicht ausgenutzt, um durch höhere Widerstandswerte im Zweig $R_2 - R_4$ den Stromverbrauch aus den zum Betrieb verwendeten Batterien zu minimieren.

Ggf. ist bei dieser Schaltung zu beachten, dass der Eingangsstrom I_{E2} von der Eingangsspannung U_{E1} abhängig ist. Eingang $E2$ muss daher von einer möglichst idealen Spannungsquelle gespeist werden (z.B. von einem OP-Verstärker-Ausgang). Im LKD#02 ist dies unproblematisch, da U_{E1} hier stets konstant ist.

Der analoge Differenzverstärker ist auch im digitalen Zeitalter noch eine höchst sinnvolle Anwendung: Man könnte ja argumentieren, dass die Differenz von zwei Spannungen heute auch erst nach Digitalisierung der zwei Einzelspannungen auf digitalem Weg berechnet werden kann. Wenn sich U_{E1} und U_{E2} aber z.B. auf einem höheren gemeinsamen Potential befinden (d.h. einen Gleichtaktanteil besitzen), würde viel von der i.d.R. kostbaren Auflösung des Digitalisierers verschenkt werden. (Außerdem ist im LKD#02 ausschließlich ein klassischer analoger Ausgang vorgesehen.)

#18. Messkammer zum Monitoring der Radon-222-Konzentration in Innenräumen

Ein derartiges System zum Selbstbau wurde bereits auf der Webseite

<https://www.theremino.com/en/hardware/inputs/radioactivity-sensors>

vorgeschlagen. Angesichts der kleinen zu erwartenden Zählraten wäre es jedoch erheblich sinnvoller, das Volumen der dort beschriebenen Messkammer (ca. 1 Liter) weiter zu vergrößern.

Das Funktionsprinzip ist identisch mit dem des käuflich erhältlichen Gerätes **Radon Eye RD200** (Hersteller: Firma FTLAB (Südkorea), www.radonftlab.com), zu dem im Internet eine Reihe von Angaben kursieren (z.B. in Form von User Manuals). Wie heute leider üblich, werden dort allerdings nur wenige für das grundlegende Verständnis des Messprinzips und der Auslegung des Messgerätes brauchbare technische Daten angegeben. Der wichtigste Hinweis dürfte sein:

Type: pulsed ion chamber 200 cc bzw.

Messart: Gepulste Ionen-Messkammer 200 cc

Die Ausdrucksweise (pulsed / Gepulste) ist zunächst sehr gewöhnungsbedürftig. Eine Ionisationskammer (IOK) kann nicht sinnvoll (von einer angeschlossenen Elektronik) "gepulst" werden. Eine Ionisationskammer kann nichts anderes tun als das, wofür die vorgesehen ist: nämlich die in ihr freigesetzten elektrischen Ladungen aufzusammeln, so wie sie eben eintreffen.

Es ist (mit dem korrekten Ausdruck **Impuls-Ionisationskammer**) die Betriebsart der IOK gemeint, d.h. die technische Art und Weise, wie die von der IOK gesammelten und gelieferten Ladungen weiter ausgewertet werden:

1. In der bei IOKs am häufigsten gewählten Betriebsart **Strom-Ionisationskammer** wird der an ihrer Anode aufgefangene mittlere Elektronenstrom gemessen.
2. In der bei IOKs weniger häufig gewählten Betriebsart **Impuls-Ionisationskammer** wird der aus jedem einzelnen Ionisierungsvorgang in der Kammer resultierende Stromimpuls als Messgröße verwendet. D.h. die in der IOK spontan erfolgenden, separaten Zerfalls- und Ionisierungsereignisse sind ursächlich für an der Anode zeitlich getrennt aufgefangene Stromimpulse, aus denen eine angeschaltete Elektronik die gewünschte Information entnimmt. Diese Betriebsart ist nur bei der Messung von Alpha-Strahlung möglich, weil nur hier ein einzelnes Strahlungsteilchen elektrische Ladungen in messbar großer Zahl freisetzt.

Die letztgenannte Auswertung kann also nur erfolgreich sein, wenn die einzelnen Ionisierungsereignisse

- a. **so selten** eintreffen, dass die Überlagerung von zwei gleichzeitigen Ereignissen (und damit ihre gegenseitige Störung) unwahrscheinlich ist, und außerdem
- b. **so groß** sind, dass sie jeweils einzeln deutlich nachgewiesen werden können (und nicht nur als Summensignal aus unbekannt vielen Ereignissen, wie in Betriebsart 1. (s.o.).

Es wurden zunächst für das betrachtete Gerät Daten aus Internet-Angaben gesammelt, zusammengestellt, und auf Konsistenz und damit auf Glaubwürdigkeit überprüft.

Zu a.: Häufigkeit des Eintreffens von Radonzerfallsereignissen in der IOK

Für das diskutierte Messgerät wurden aus dem Internet auf zwei Anbieterseiten (html) und in vier Manuals (pdf) u.a. folgende Angaben gefunden:

1. Measurement range:	(keine Angaben).....	(1)
2. Sensitivity:	0,5 cpm/pCi/l at 10 pCi/l (30 cph/pCi/l).....	(2)
3. Sensitivity:	18,5 cpm/Bq/m ³ at 370 Bq/m ³	(2)
4. Range:	0,1 ... 99,99 pCi/l (0,1 ~ 3.700 Bq/m ³).....	(2)
5. Sensitivity:	0,5 cpm/pCi/l at 10 pCi/l (30 cph/pCi/l).....	(3)
6. Measurement range :	0,1 ~ 255 pCi/l (9,435 Bq/m ³).....	(3)
7. Empfindlichkeit:	0,5 cpm/pCi/l (1,35 cpm / 100 Bq/m ³).....	(4)
8. Messbereich:	0,1 ~ 99,99 pCi/l (1 ~ 3700 Bq/m ³).....	(4)
9. Sensitivity:	0,5 cpm/pCi/l (1,35 cpm / 100 Bq/m ³).....	(5)
10. Range:	0,1 ~ 99,99 pCi/l (1 ~ 3700 Bq/m ³).....	(5)
11. Sensitivity:	0,5 cpm/pCi/l (1,35 cpm / 100 Bq/m ³).....	(6)
12. Range:	0,1 ~ 99,99 pCi/l (1 ~ 3700 Bq/m ³).....	(6)

Quellen (Abfrage 2020-08-26):

1. <https://www.amazon.de/Radon-Eye-Messger%C3%A4t-schnell-Messwert/dp/B01IH7SGCQ#descriptionAndDetails>
2. <https://www.radon.ch/index.php/online-shop/58-radon-eye>
3. ENG_Quickguide_RD200P2.pdf (Smart Radon Gas Detektor RADON EYE+ Operation Manual RD200P)
4. Radon-Eye-20170217.pdf (Radon Eye Kurzanleitung - Deutsch)
5. (20160706)_OPERATION_MANUAL_(web).pdf
6. RadonEye_Quickguide_(web).pdf

Das Gerät ist zwischen zwei Anzeigemodi umschaltbar: zwischen der Anzeige in der veralteten, aber in den angelsächsisch beeinflussten Ländern noch benutzten Einheit **Curie** (Ci), sowie der aktuellen SI-Einheit **Becquerel** (Bq). Dabei wird die erstgenannte Einheit vom Hersteller offenbar noch als Grundeinheit verwendet. Da die obigen Angaben in beiden Einheiten z.T. widersprüchlich sind, werden hier im folgenden die Angaben aus der Auflistung in der Einheit Ci verwendet und in solche der Einheit Bq umgerechnet.

Für das **Ansprechvermögen** (Sensitivity, Empfindlichkeit) der Messkammer in einem Innenraum wird zunächst die folgende Plausibilitätsbetrachtung angestellt:

Radon-222 ist zwar deutlich schwerer als Luft, verteilt sich zumindest in der Zimmerluft jedoch praktisch homogen. Das im Gleichgewichtszustand in die IOK eindiffundierte Luftvolumen von (angeblich) $V = 200 \text{ cm}^3 = 0,2 \text{ L} = 0,0002 \text{ m}^3$ besitzt folglich dieselbe Radonkonzentration wie die Zimmerluft. Eine Radonkonzentration von $C = 1 \text{ Bq/m}^3$ wird daher in der Kammer eine Radonzerfallsrate von $n = C \cdot V = 1 \text{ Bq/m}^3 \cdot 0,0002 \text{ m}^3 = 0,0002 \text{ Radonzerfälle/s}$ bzw. eine Impulsrate von $n = 0,012 \text{ cpm}$ bewirken (bei 100%iger intrinsischer Nachweiswahrscheinlichkeit, d.h. falls ein Radonzerfall genau einen Impuls auslöst). Eine Radonkonzentration von $C = 100 \text{ Bq/m}^3$ erzeugte damit entsprechend $n = 1,2 \text{ cpm}$ in der Kammer.

Falls die für das Ansprechvermögen mehrfach gefundene Angabe (obige Listenpkt. 2., 4., 7., 9., 11) **Sensitivity:**.....0,5 cpm/pCi/l (1,35 cpm / 100 Bq/m³)

zutreffen sollte, dann müsste das Volumen der IOK richtiger bzw. genauer

$$V = 0,0002 \text{ m}^3 \cdot 1,35/1,2 = 0,000225 \text{ m}^3 = 225 \text{ cm}^3$$

betragen. Für die weitere Betrachtung gehe ich daher davon aus, dass die Herstellerangabe von $V = 200 \text{ cm}^3$ ("200 cc") unzutreffend bzw. ungenau ist (egal aus welchen Gründen).

Wenn man weiter die am häufigsten gefundenen Angaben über den Messbereich (in der Einheit *Ci*) als glaubhaft übernimmt, müssten die bisher diskutierten Angaben richtig lauten:

Messprinzip:.....Impuls-Ionisationskammer, $V = 225 \text{ cm}^3 = 0,225 \text{ L} = 0,000225 \text{ m}^3$

Ansprechvermögen:..... $0,0135 \text{ cpm} / \text{Bq/m}^3 = 0,81 \text{ cph} / \text{Bq/m}^3$

Messbereich:..... $3,7 \text{ Bq/m}^3 \dots 3700 \text{ Bq/m}^3$

... mit Impulsraten:..... $0,00083 \text{ cps} \dots 0,83 \text{ cps} \leftrightarrow 0,05 \text{ cpm} \dots 50 \text{ cpm} \leftrightarrow 3 \text{ cph} \dots 3000 \text{ cph}$

Die denkbaren "höchsten" Zählraten (weniger als 1 cps) werden also (einer Auswertelektronik) kein Problem bereiten. Dagegen werden die bei den allermeisten Messaufgaben (bei kleinen Radonkonzentrationen in der Raumluft) extrem kleinen Zählraten eine **miserable** Statistik verursachen!

Zu b.: Nachweismöglichkeit der aus einem Radonzerfall in der IOK gesammelten Ladung

- Um ein Luftmolekül zu ionisieren, muss eine Energie von ca. 34 eV aufgebracht werden.
- Die Kennwerte des nachzuweisenden Zerfalls sind
 - Zerfallendes Atom = ... Rn-222
 - Zerfallsart = Alpha-Zerfall
 - $t_{1/2} = \dots 3,8235 \text{ d}$
 - $E = \dots 5,590 \text{ MeV}$
 - Zerfallsprodukt = Po-218

(<https://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Radium-Reihe>, 2020-08-26)

Der Zerfall eines Atoms Rn-222 erzeugt folglich in Luft:

$5590000 \text{ eV} / 34 \text{ eV} = 164411$ Elektronen (-) und 164411 Molekülrümpfe (+).

Das vollständige Sammeln dieser Elektronen in einer IOK erbringt eine elektrische Ladung von $\Delta Q = 164411 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} = 0,026339 \text{ pAs}$. Ein solches Ereignis soll auch noch dann registriert werden, wenn z.B. nur 30 % dieser Ladungsmenge aufgefangen werden.

Zum Nachweis eines einzelnen Radonzerfalls muss diese Ladungsmenge nicht besonders genau bestimmt werden, da davon ausgegangen werden kann, dass andere Ursachen für vergleichbare Ereignisse in der IOK nicht existieren. Ganz anders also als bei der hoch auflösenden Gammaspektrometrie, bei der noch etwas weniger Ladungen zur Verfügung stehen:

Zum Vergleich: Der Nachweis von (z.B.) einem 100 keV -Quant im Ge-Detektor eines Gamma-spektrometers erfolgt über die vom Quant ca. 33784 im Detektormaterial freigesetzten Elektronen, entsprechend einer Ladung von $\Delta Q = 33784 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} = 0,005412 \text{ pAs}$. Diese kleine Ladungsmenge muss dann mit einer Abweichung von höchstens 1 % ausgemessen werden !

Elementarer Sauerstoff ist bekanntlich so hochreaktiv, dass je zwei freie Atome spontan zu einem gemeinsamen O_2 -Molekül reagieren. Diese binden auch darüber hinaus evtl. in der Luft vorhandene freie Elektronen an sich - Sauerstoff wird daher als **Elektronenfänger** bezeichnet. Diese Einfang-Vorgänge binden alle durch Strahlung freigesetzten Ladungsträger, und die dadurch geladenen Einzelmoleküle verbinden sich weiter innerhalb weniger μs zu **Clustern** aus mehreren Gasmolekülen, die als (positive bzw. negative) **Kleinionen** bezeichnet werden. Schnell bewegliche freie Elektronen, wie sie z.B. in geschlossenen, edelgasgefüllten Detektoren (Proportionaldetektoren, Geiger-Müller-Zähler) den Effekt der Gasverstärkung bewirken können, gibt es in luftgefüllten Detektoren nicht.

Diese **Kleinionen** oder **Leichten Ionen** besitzen in Gasen unter dem Einfluss einer elektrischen Feldstärke von $E = 1 \text{ V/cm}$ ungefähr eine Beweglichkeit von $k = 1,5 \text{ cm/s}$, und sind ganz überwiegend auch für die Elektrizitätsleitung in der freien Atmosphäre ursächlich. In einer offenen, luftgefüllten Ionisationskammer besteht die auf den Elektroden gesammelte elektrische Ladung aus dieser Art von Ladungsträgern.

Befinden sich in der Luftmasse Verunreinigungen (sog. Aerosole), wie z.B. Wassertröpfchen (Nebel, Wolken), Staubteilchen etc., so neigen die **Cluster** wiederum zur Anlagerung und bilden mit diesen **Großionen** oder **Schwere Ionen** mit um einen Faktor von z.B. 4000 größerer Masse und um diesen Faktor kleinerer Beweglichkeit und Stromleitfähigkeit.

Kosmische ionisierende Strahlung bzw. die aus ihr in der Atmosphäre durch Wechselwirkungsprozesse erzeugte sekundäre Strahlung begünstigen damit über die freigesetzte elektrische Ladung die Kondensation von Wassertröpfchen in der Atmosphäre und damit die Wolkenbildung. (Im Kleinen kann dieser Effekt ja in jeder Nebelkammer beobachtet werden.)

Wenn in einer Ionisationskammer jeweils die durch den Einfall **einzelner** Alphastrahlen freigesetzten Ladungsträger gemessen werden sollen, müssen diese zumindest so schnell gesammelt und damit aus der Kammer entfernt werden, dass die Überlagerung mit der Ladungserzeugung durch weitere Alphastrahlen zumindest unwahrscheinlich (bzw. selten) ist. Die überschlägige Berechnung einer Kammer mit (idealisiert) linearem elektrischen Feld ergäbe bei $U = 200 \text{ V}$ und mittlerem Elektrodenabstand $d = 4 \text{ cm}$ eine Ladungssammelzeit von

$$t = \frac{1}{k \cdot E} = \frac{d}{k \cdot U} = \frac{4 \text{ cm} \cdot \text{s}}{1,5 \text{ cm} \cdot 200 \text{ V}} = \frac{1}{75} \text{ s} \approx 13,3 \text{ ms}$$

(Realistischere Abschätzungen für Ionisationskammern mit zylindrischem Feld siehe unter **#04**.)

Die in der IOK freigesetzten Ladungen könnten z.B. also sinnvoll über die Zeit $\Delta t = 20 \text{ ms}$ aufintegriert werden. Mit einem ladungsempfindlichen Vorverstärker (ein Operationsverstärker mit z.B. $C = 5 \text{ pF}$ in der Rückführung) sollte so jeder in der IOK erfolgende Radonzerfall einfach in einen ladungsproportionalen Spannungsimpuls von $\Delta U = \Delta Q/C = 0,026339 \text{ pAs} / 5 \text{ pF} = 5,27 \text{ mV}$ umgewandelt werden. Die Anforderungen an die Rauscharmut sind ungleich kleiner als in der Gamma-spektrometrie; vollständige Abschirmung ist jedoch auch hier unumgänglich.

Auf diese grundsätzliche Weise wird auch im Radon-Monitor **Radon Eye RD200** die Signalverarbeitung erfolgen. Für diese Annahme spricht auch die in den Datenblättern gemachte Bedingung der erschütterungsfreien Aufstellung des Gerätes: die Kombination von IOK und Vorverstärker neigt zur Mikrophonie, wie es auch die entsprechenden Stufen in der Gamma-spektrometrie tun.

Zur weiteren rauscharmen Verstärkung muss ein klassischer Hauptverstärker nachgeschaltet werden, der für diese seltenen, vergleichsweise langdauernden Impulse aus einigen nicht besonders schnellen Operationsverstärkern bestehen kann, und das Signal weiter konditioniert. An die Schaltungseigenschaften werden wieder kleinere Anforderungen gestellt als in der Gamma-spektrometrie, weil in diesem Fall die Signalverarbeitung nicht auf die Verarbeitung hoher Impulsraten ausgelegt werden muss.

Die für die Impulsverarbeitung erforderliche Schaltungstechnik lässt sich - wie erwähnt - gut von den in der klassischen Kernstrahlungsmesstechnik angewandten Methoden ableiten, für deren Details besonders das Studium von Manuals dort verwendeter Geräte zu empfehlen ist. Eine eher umfassende Übersicht bietet dagegen z.B.:

Schmidt, Hans Ulrich: Meßelektronik in der Kernphysik. Teubner, Stuttgart 1986.

#19. Gedanken zum Bau eines eigenen Prototypen einer Rn-222 - Messkammer

(Vorsicht: Baustelle im Rohbau)

Für größtmögliche Ansprechempfindlichkeit und zum Erhalt einer guten Zählstatistik soll die Impulsrate und folglich das Volumen möglichst groß sein. Es wird daher hier die angedachte Konstruktion einer Messkammer aufgegriffen, wie sie weiter oben (vgl. #02) für eine IOK aus einer Anzahl hermetisch dicht aufeinandergelöteter Elemente zur Messung der natürlichen Umgebungsstrahlung andiskutiert wurde.

In der Messkammer von

<https://www.theremino.com/en/hardware/inputs/radioactivity-sensors>

ist der zentrale Anodendraht höchst isoliert aufgehängt und wird als konstante Kapazität zum Kathodenmantel betrieben, so dass auf dem Anodendraht eine Anzahl aufgesammelter Ladungen einen kleinen Spannungsimpuls erzeugt, der sehr hochohmig weiter verstärkt wird.

In der hier angedachten Konstruktion wird dagegen das Potential des gut isolierten Anodendrahtes konstant gehalten und die Anzahl aufgesammelter Ladungen von einem ladungsempfindlichen Vorverstärker in einen (belastbaren) Spannungsimpuls umgesetzt. Da der Eingang eines ladungsempfindlichen Verstärkers niederohmig ist, kommt dieses Schaltungskonzept mit ganz deutlich kleineren, noch als präzise Elektronik-Bauteile zu realisierenden Widerständen (einige $100\text{ M}\Omega$) aus - ganz anders, als sie beim Konzept der Aufnahme als Spannungsimpuls erforderlich sind (mehrere $G\Omega$ bis hin zu $1\text{ T}\Omega$).