

Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Rolf Goedecke

LKD - Ein luftoffener Kontaminationsdetektor für α -Strahlung

0. Einführung	2
1. Erster Prototyp (LKD#01): Entwurf und Aufbau	3
2. Erster Prototyp (LKD#01): Vermessung und Abschätzung der Eigenschaften	10
3. Zweiter Prototyp (LKD#02): Entwurf und Aufbau	20
4. Zweiter Prototyp (LKD#02): Vermessung und Abschätzung der Eigenschaften	28
5. Dritter Prototyp (LKD#03): Entwurf und Aufbau	XX
6. Dritter Prototyp (LKD#03): Vermessung und Abschätzung der Eigenschaften	YY
7. Verweise	32

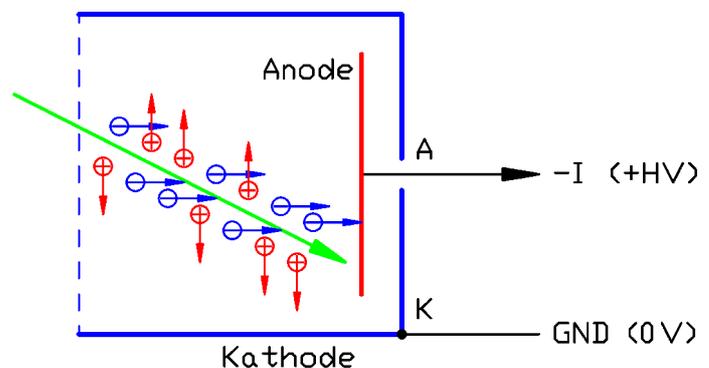
Parallel mit den hier beschriebenen Entwicklungen entstand zu diesem Thema mein Neben- oder Hintergrundpapier: ***IOK-Betrachtungen - Unsortierte Sammlung von Gedanken im Zusammenhang mit dem Bau von Ionisationskammern***, auf das hier summarisch verwiesen wird.

© 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.

0. Einführung

In Beschreibungen im Internet werden von mehreren Autoren mit elementaren Mitteln selbstgebastelte Ionisationskammern zum Nachweis von α -Strahlung vorgestellt (0). In den einfachsten Fällen bestehen diese lediglich aus einigen normalen, leeren Konservendosen, sowie einer kleinen Handvoll von Elektronik-Standardbauteilen. Nachdem ich bei einem befreundeten, engagierten Arbeitskollegen seine Prototypen eigener realer Nachbauten in Augenschein und auch versuchsweise in Betrieb nehmen durfte, war meine Verblüffung groß und die Faszination endgültig geweckt (1). Bei den zur Debatte stehenden Low-Level-Ionisationskammern handelt es sich (nach meinem damaligen und heutigen Eindruck) um höchst fragile Geräte, in denen allerschwächste Ströme gemessen werden - noch deutlich kleinere als es schon die unvermeidbaren Oberflächen-Kriechströme auf handelsüblichem Platinenmaterial (FR4) sind. Die für mich offenen Fragen waren also, inwieweit Anzeigewerte derartiger Konstruktionen unabhängig von anderen Umwelteinflüssen (besonders Temperatur, Luftfeuchte, Zeit) und damit brauchbar sein würden, ob eine Bestrahlung in Gegenwart dieser Einflüsse überhaupt stabil nachweisbar sein würde, und inwieweit neben dem sehr anschaulichen Einsatz für Lehr- und Ausbildungszwecke evtl. auch eine sinnvolle Nutzung für ernsthafte Messzwecke ausgelotet werden könnte.

Das Prinzip von Ionisationskammern (IOKs) ist, zumindest auf dem Papier, extrem einfach. Ionisierende Strahlung (grüner Pfeil) erzeugt - schon per Definition - im bestrahlten Medium, hier der vormals elektrisch neutralen Luft, eine der in der Luft abgegebenen Strahlungsenergie entsprechende Anzahl positiv und negativ geladener Ionen. Diese werden in der IOK durch geeignet angeordnete elektrische Felder auf leitfähige Elektroden, die Anode bzw. die Kathode gezogen, wo die Ionen Elektronen entziehen bzw. abgeben. Damit sind die gesammelten Ladungen in elektrischen Strom umgesetzt worden. Die angeschlossene Elektronik muss (im Bsp.) das Problem lösen, an der mit positiver Hochspannung ($+HV = U_{AK}$) vorgespannten Anode den dort eintreffenden, sehr schwachen Elektronenstrom zu messen. Die Kathode ist bei dem in der Skizze gezeigten (ebenso wie beim hier realisierten) Modell identisch mit dem Kammergehäuse (Material: Weissblech) und mit Schaltungnull (GND) verbunden.



Im Bereich hoher Strahlungsintensitäten ist dieses Verfahren problemlos; bei kleinen Strahlungsintensitäten (wie dies erfreulicherweise die natürliche Umgebungsstrahlung ist) werden IOKs selten eingesetzt, da sie hier zu unempfindlich sind.

Dies liegt daran, dass die Ionisationswirkung und der daraus erzeugte Strom bei Art und Intensität der normalen, **locker ionisierenden** Umgebungsstrahlung (Beta- und Photonen-Strahlung) außerordentlich klein sind; so dass für deren genaue Messung in aller Regel andere Strahlungsdetektoren zum Einsatz kommen (i.d.R. solche, bei denen die durch Strahlung erzeugten Primäreffekte durch spezielle Mechanismen noch im Detektor selbst hoch verstärkt werden, wie z.B. in Proportionaldetektoren, Auslösezählern, Szintillationsdetektoren - und nicht erst ausschließlich von einer dem Detektor nachgeschalteten Elektronik).

Einzig der Anteil der Umgebungsstrahlung, der aus der **dicht ionisierenden** Alpha-Strahlung besteht, wie sie beim Zerfall sehr schwerer Atomkerne (Uran, Thorium, Radium, Radon, ...) auftritt, ist evtl. mit selbstgebauten IOKs messbar. α -Strahlung gibt ihre erhebliche Zerfallsenergie ($W_\alpha \approx 5 \text{ MeV}$ und etwas darüber) auf kürzester Wegstrecke ab (Reichweite in Luft $R \approx 5 \text{ cm}$). Da zur Ionisierung eines Luftmoleküls (und damit zur Freisetzung einer Elementarladung) eine Energie von $W_{Ion} \approx 34 \text{ eV}$ benötigt wird, setzt die gesamte Strahlungsenergie eines Alpha-Zerfalls damit

$$n = \frac{W_\alpha}{W_{Ion}} = \frac{5 \text{ MeV}}{34 \text{ eV}} \approx 150.000 \text{ Elektronen}$$

frei. Erfolgt in der IOK ein kompletter Nachweis eines solchen "Pulks" von eintreffenden Elementarladungen ($q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$) je Sekunde, so entspricht dies einem mittleren Strom von

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot q_e}{t} = \frac{150.000 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{1 \text{ s}} = 0,024 \text{ pA} \quad .$$

Dies ist immer noch (trotz der optimalen Bedingung durch α -Strahlung etc.) **ein so grauenhaft kleiner Strom**, dass auch sehr versierte Elektronik-Messtechniker bei dieser Betrachtung normalerweise das Handtuch werfen.

Wenn es überhaupt gelingt, so kleine Ströme ausreichend stabil zu verstärken, wie dies in den oben genannten Beschreibungen im Internet suggeriert wird, liegt das nächste Problem darin, diese Stromverstärkung dauerhaft ungestört von Umwelteinflüssen, insbesondere von Leck- und Kriechströmen zu halten. Der mechanische Aufbau der Messkammer selbst, sowie der der empfindlichen Eingangsstufe, sind daher hier als Bestandteil der Elektronik zu verstehen.

1. Erster Prototyp (LKD#01): Entwurf und Aufbau

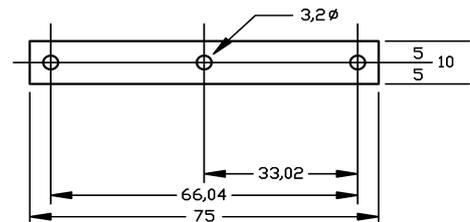
Als Grundlage für den Aufbau der Messkammer wurde eine handelsübliche leere Konservendose verwendet. Da die Innenwand gleichzeitig als eine der Elektroden (hier als Kathode) der IOK dient, eignen sich ausschließlich leere Dosen mit innen leitfähiger Oberfläche; vorzugsweise aus blankem Weissblech (verzinntes Stahlblech). Damit sind leider nur die wenigsten üblichen Dosentypen verwendbar. Evtl. vorhandene Innenlackierungen müssen, sofern dies überhaupt möglich ist, vollständig entfernt werden (i.d.R. dürfte der Aufwand hierfür allerdings unverhältnismäßig hoch sein). Die nicht sehr weit verbreiteten Aluminiumdosen scheiden wegen ihrer Eloxierung grundsätzlich aus.

Als Messkammer für den Prototyp wurde eine leere Erdnussdose verwendet (ALDI, Marke **Trader Joe's**®, 0,89 €), die die genannten Anforderungen erfüllt und auch eine handlich-passende Größe besitzt ($83 \text{ mm } \varnothing \cdot 73 \text{ mm}$). Als Anode dient ein kreisrundes Stück FR4 ($56 \text{ mm } \varnothing$) mit einseitiger Cu-Auflage. Dieses ist zentrisch durchbohrt ($3,2 \text{ mm } \varnothing$) und über einen Abstandshalter aus Polystyrol $M3 \times 5 \text{ mm}$ mit einer M3-Schraube mittig auf einen schmalen Polystyrol-Streifen von $75 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}$ aufgeschraubt. Die extreme Isolation dieses Trägermaterials ist eine der entscheidenden Voraussetzungen für das Gelingen des Projekts.

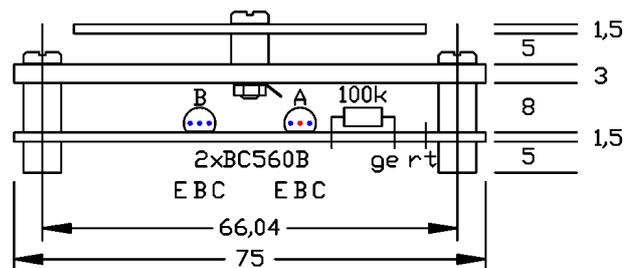


Polystyrol ist leicht erhältlich, und nach Tabellen zur elektrischen Leitfähigkeit allgemein gebräuchlicher Konstruktionsmaterialien einer der Stoffe mit dem höchsten spezifischen Widerstand von Isolierstoffen überhaupt ($\rho \approx 10^{15} \Omega m \dots 10^{16} \Omega m$). In der Literaturquelle, aus der ich diesen Wert entnommen habe (2) wird ausschließlich **Bernstein** als ein noch etwas besserer Isolator genannt. Das gebräuchliche Platinenmaterial FR4 (Glasfaser-Epoxid) wird dagegen (in anderen Quellen) "nur" mit einem spezifischen (Durchgangs-)Widerstand von $\rho \geq 10^{10} \Omega m$ spezifiziert. Manchmal werden allerdings auch Übererfüllungen der Norm angegeben, wie z.B. $\rho = 8 \cdot 10^{12} \Omega m$. Da man als Kleinstanwender aber i.d.R. keinen Zugang zu besonders spezifiziertem Material hat, ist es sinnvoll, von Standardangaben auszugehen.

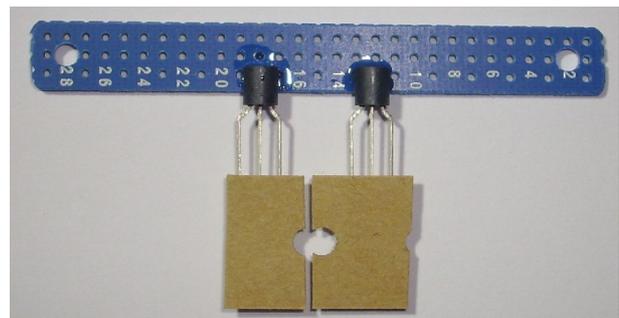
An den beiden außen liegenden Bohrungen wird das Konstruktionsstück mit Hilfe zweier M3-Metallschrauben und weiteren Abstandshaltern am (mit einer FR4-Platte verstärkten) Dosenboden *isoliert* befestigt. Die Schrauben befinden sich damit nicht auf Dosenpotential (= Kathodenpotential), sondern sie werden in voller Absicht (bis auf ca. 400 mV) auf Anodenpotential gelegt (Schaltung siehe weiter unten). Damit realisiert der mechanische Aufbau bis zum Polystyrol-Streifen eine elektrische Guard-Konstruktion, die einen denkbaren Stromfluss von der Befestigungsmechanik hin zur Anode - auch durch Oberflächenleitfähigkeit (bei höchster Sauberkeit!) - soweit wie möglich verhindert.



Die elektrische Verbindung von der Anode zum Verstärker erfolgt über eine Lötfläche an der Anodenbefestigungsschraube unterhalb des Polystyrolstreifens, an der selbstverständlich nicht im zusammengeschraubten Zustand gelötet werden darf, denn Polystyrol ist ja nicht wärmebeständig. Die nebenstehende Abbildung zeigt den gesamten, normalerweise von der Anodenplatte verdeckten Innenaufbau der Messkammer im Schnitt.

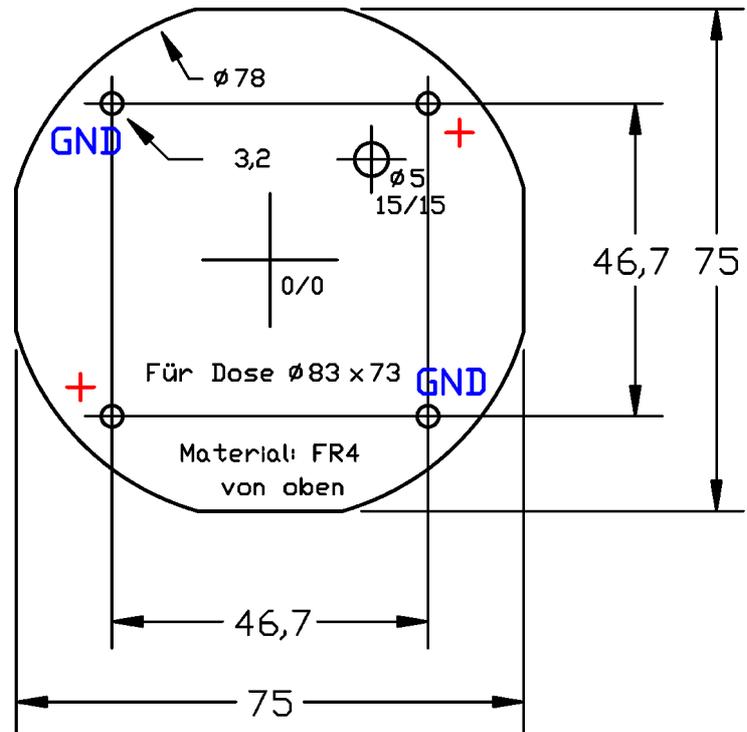


Dort ist auch die im Aufbau integrierte Halterung für den (in diesem ersten Prototyp) sehr einfach realisierten Verstärker zu sehen - es handelt sich um einen Streifen Platinenmaterial mit derselben Länge und Breite wie beim Anodenhalter aus Polystyrol. Auf dieses Material sind zwei Kleinsignal-Transistoren mit Epoxidkleber so aufgeklebt, dass ihre Anschlussseiten frei über den Platinenrand hinausragen (Aushärtung bei +90 °C).



Die kleine Anordnung wurde unter Beachtung allerhöchster Sauberkeit hergestellt, denn die Vermeidung von Kriechströmen zwischen den hochempfindlichen Transistoranschlüssen ist essentiell! Jede noch so kleine (in unregelmäßiger und unvorhersehbarer Weise eingebrachte) Verschmutzung im Bereich der schwarzen Epoxid-Gehäuse der Transistoren wäre für die hier geschilderte Messaufgabe katastrophal! Im Grunde ist es eine enorme und selten gewürdigte technische Routineleistung der Halbleiterhersteller, die Kunststoffgehäuse ihrer Produkte - und das in laufender Großserienproduktion! - so unglaublich hochisolierend herzustellen, dass zu messende Ströme im Picoamperebereich noch nicht nennenswert durch Leck- und Kriechströme im oder am Transistorgehäuse überlagert werden!

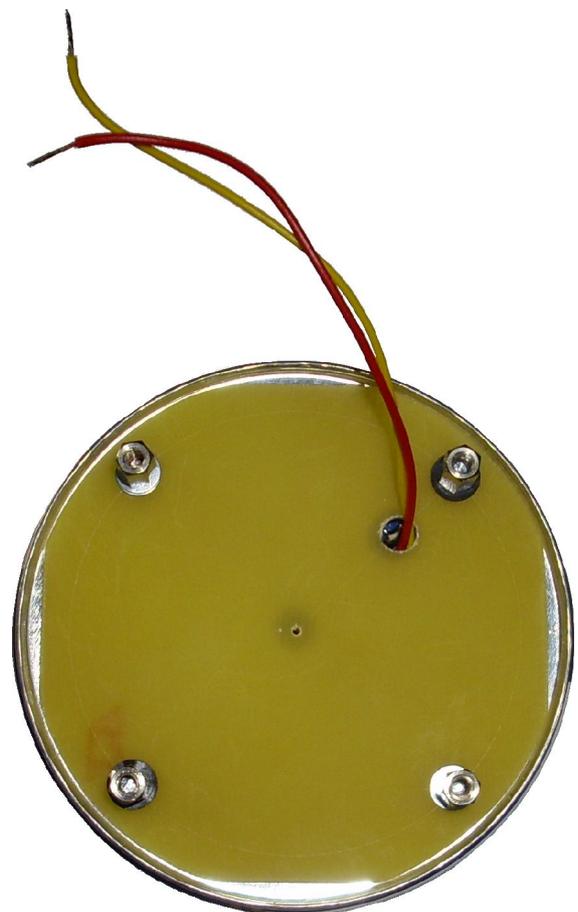
Die gegenüber dem (auf GND-Potential befindlichen) Dosenkörper isolierte Montage des kleinen Stapels aus Anodenplatte, Abstandhaltern, Polystyrolstreifen und transistortragender Platine am Dosenboden erfolgt unter Verwendung der nebenstehend gezeigten Platine durch die mit + gekennzeichneten Löcher hindurch (an denen der Dosenboden zwecks Isolation etwas weiter - auf 5,5 mm - aufgebohrt ist). Über die hier hindurchgeführten Schrauben erhält der Innenaufbau sein Guard-Potential. Die Leitungen *rt* und *ge* werden durch die Bohrung (5 mm Ø) hindurchgeführt. Im Prototyp ist die Platine, die auch zur Erhöhung der mechanischen Stabilität des Dosenbodens beiträgt, wie unten gezeigt noch ganz ohne Cu-Auflage; sie kann aber in evtl. späteren Versionen auch (z.B. in SMD-Bestückung) weitere Elektronik, z.B. zur A/D-Wandlung des verstärkten Messstroms, und/oder zur Umsetzung in eine Impulsrate aufnehmen (wenn erst auf Grundlage der noch zu erhebenden Daten am Prototyp klar geworden ist, in welcher Form eine weitere Messsignalverarbeitung notwendig oder sinnvoll erscheint). (Bei Vorhandensein größerer FR4-Stücke darf die Platine gerne auch kreisrund sein.)



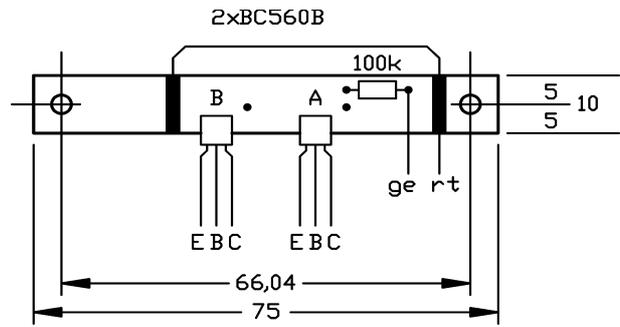
Für den Prototypen erhält der "Unterbau" lediglich zwei getrennte Trockenbatterien zur Spannungsversorgung des Darlingtontransistors sowie zur Herstellung des IOK-Potentials zur Ladungstrennung. Aufgrund der äußerst kleinen Ströme wird die Lebensdauer der Batterien nur von ihrer maximalen Lagerzeit begrenzt. Die Batterien konnten daher fest angelötet werden. Außerdem wurde auf einen Ein-Ausschalter verzichtet - so wird auch die störende Totzeit beim Einschalten vermieden (diese wird durch die sonst beim Schaltvorgang unvermeidliche Umladung der Anodenplatte bewirkt).

Die in der Masszeichnung mit **GND** gekennzeichneten Befestigungsbolzen wurden so weit verlängert, dass der Unterbau mit einer weiteren, abschirmenden Dose bündig zu einer kompakten Einheit verschraubt werden kann.

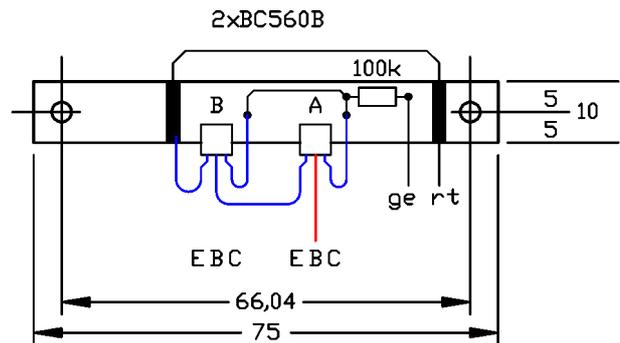
Über zwei isolierte Standard-Bananenbuchsen am Boden des Unterbaus kann der Messstrom aus dem vollständig abgeschirmten Gerät abgenommen und mit einem externen digitalen Standard-Vielfach-Messinstrument gemessen werden (Bilder s.u.).



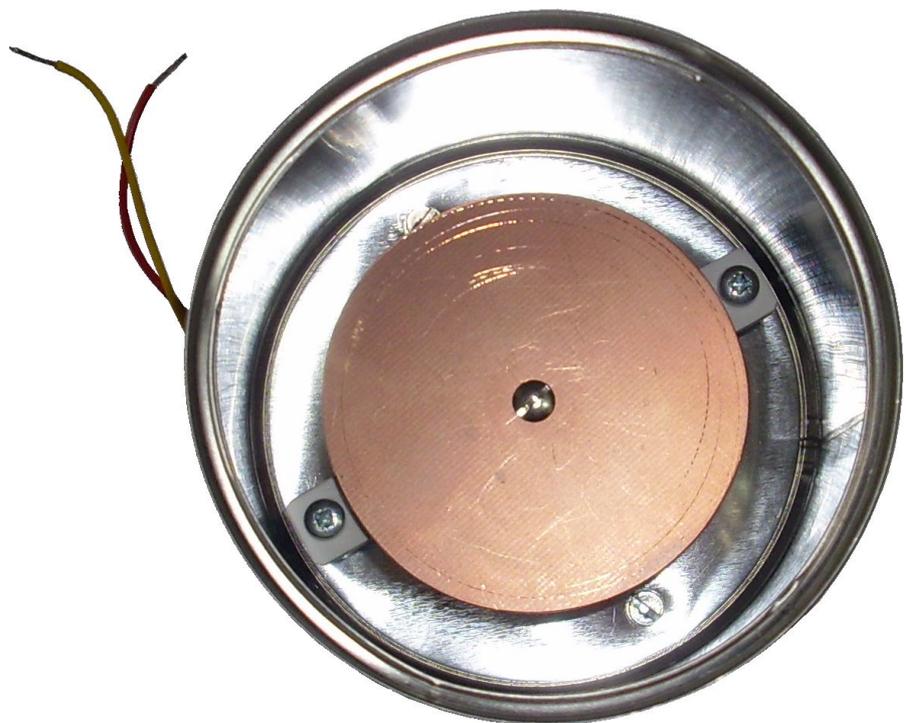
Der in der Schnittzeichnung des Innenaufbaus (oben) **rot** gezeichnete höchstempfindliche Basisanschluss des Eingangstransistors A ist über einen (hier nicht miteingezeichneten) Widerstand von $100\text{ k}\Omega$ freitragend mit der Anoden-Lötfahne, d.h. ohne jede Platinenberührung verbunden. Anschluss E dieses Transistors führt in eben dieser (freitragenden) Technik (ohne jede Platinenberührung) zum Anschluss B des Transistors B - so entsteht die bekannte Darlingtonschaltung. Die Anschlüsse C beider Transistoren führen zum eingezeichneten Widerstand von $100\text{ k}\Omega$ und weiter über die Leitung **ge** (=gelb) durch den unten vorstellbaren Dosenboden, ebenso wie dies beim Anschluss E des Transistors B über die Leitung **rt** (= rot) vollzogen ist.



Sowohl der hochsensible Basisanschluss des Eingangstransistors wie auch die Verbindung zwischen den beiden Transistoren sind also so gut wie irgend möglich isoliert (durch Luft). Die in der Skizze rechts **schwarz** gezeichneten Platinenflächen sind zusätzliche Guardleiter und befinden sich auf demselben positiven Potential wie die Befestigungsschrauben. Die beiden o.g. Widerstände stellen einen vollkommenen Schutz der sensiblen Eingangsschaltung sicher; gleichzeitig gibt es an ihnen im normalen Betrieb keinen nennenswerten Spannungsabfall (wegen der nur äußerst kleinen Ströme). Eine evtl. Demontage des skizzierten Aufbaus in der Messkammer (unsichtbar unter der Anodenplatte gelegen) ist zwar jederzeit möglich, jedoch für den Normalfall nicht mehr vorgesehen, damit eine versehentliche Verschmutzung nicht stattfinden kann. Gleichzeitig ist die Eingangsschaltung mechanisch und elektrisch optimal geschützt.



Die Höhe des Einbaus in der Dose bis incl. der Anodenplatte beträgt genau 24 mm (vgl. Skizze oben); aufgrund der gesamten Dosenhöhe von (innen) ca. 67 mm bis zum Ring-Pull-Rand (spätere Auflage der abschließenden Lochplatte) bleibt eine freie Innenhöhe von ca. 43 mm , und damit eine angemessene Wegstrecke zur Abbremsung der nachzuweisenden α -Teilchen. Die entsprechend dieser Energieabgabe im Innenraum freigesetzten Luftionen werden vom dort bestehenden elektrischen Feld auf die Kathode (Dosenkörper) bzw. auf die Anode gezogen.

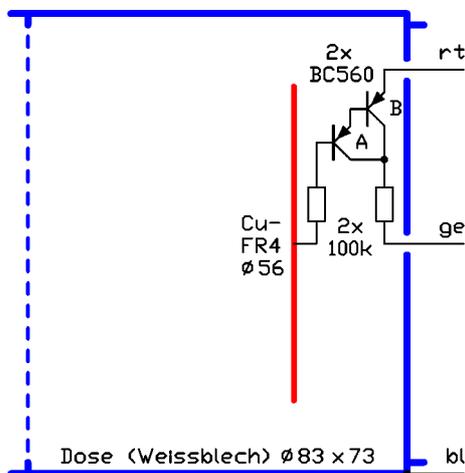
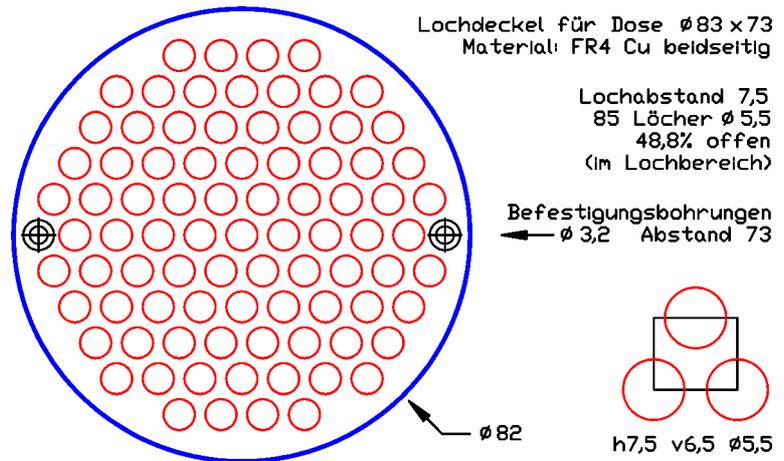
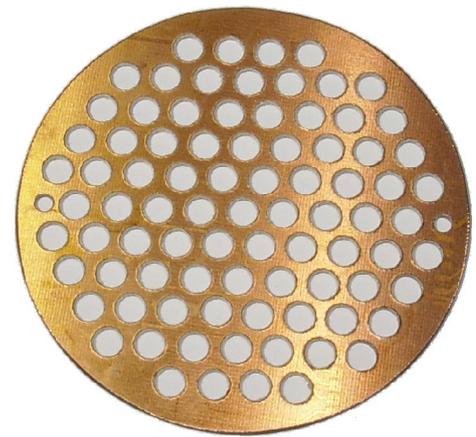


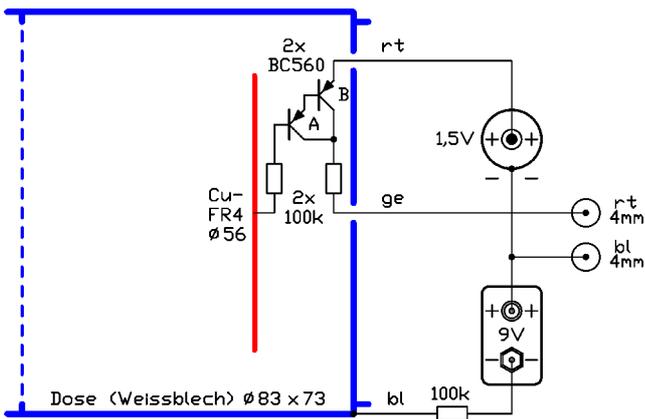
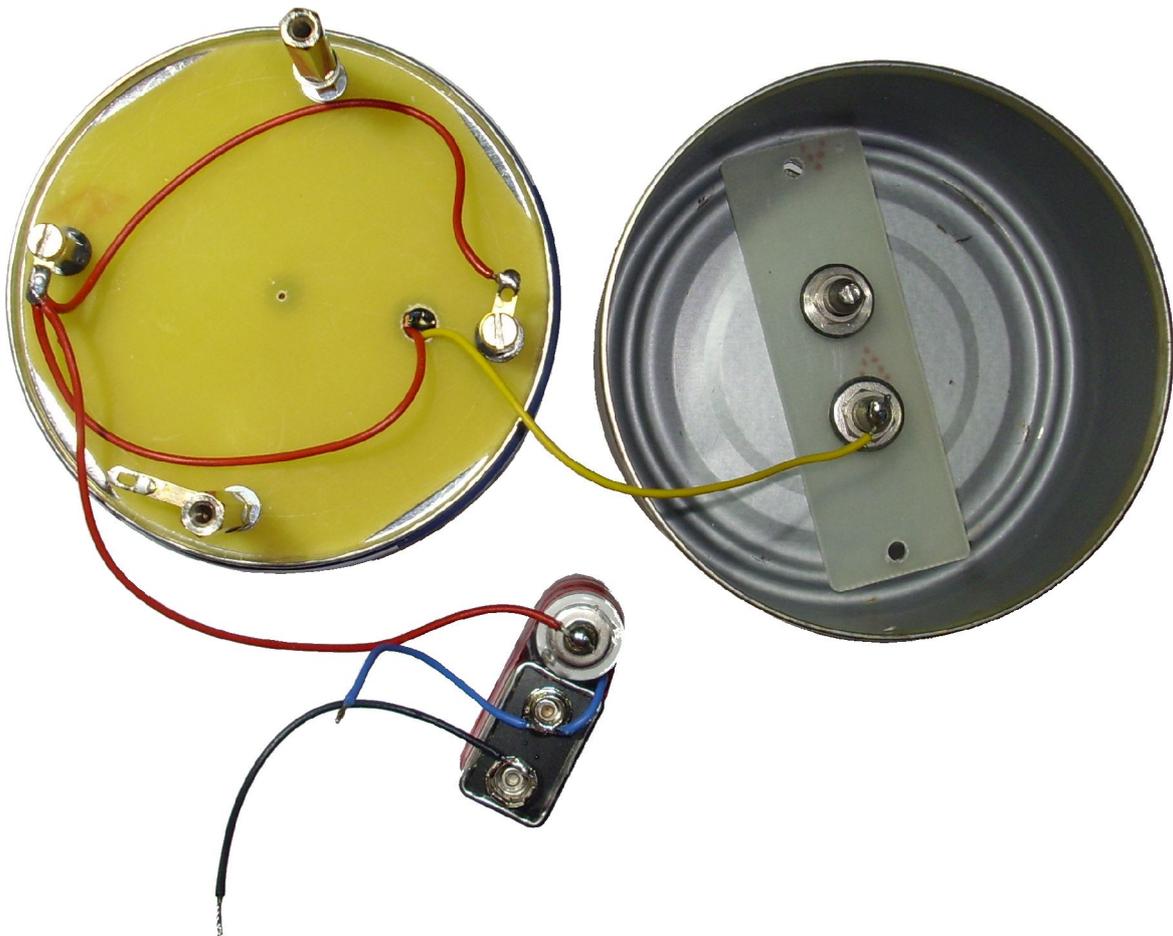
Die Abdeckung des Kammerinnenraums mit der gezeigten Lochplatte (in diesem ersten Modell aus Platinenmaterial FR4 mit zweiseitiger Cu-Auflage) ist äußerst wichtig

- für die Vervollständigung der Kathodenfläche
- für die vollständige Abschirmung des Kammerinneren gegen von außen in die Kammer eingreifende elektrische Gleich- und Wechselfelder.

Trotz dieser elektrischen Vorgaben muss natürlich noch die nachzuweisende α -Strahlung in das empfindliche Volumen der Kammer eindringen können. Im Bereich der Löcher ist dies aufgrund der Geometrie im Mittel zu knapp 50 % gewährleistet, während äußere elektrische Felder nahezu vollständig abgeschirmt werden, da die Feldlinien aufgrund des sehr hohen Unterschieds der Leitfähigkeiten von Luft und Kupfer senkrecht auf der Kupferoberfläche enden und sich dort konzentrieren. Der Durchgriff in den Innenraum ist bei dieser Lochgröße noch minimal.

Damit ist eine luftoffene Ionisationskammer entstanden, die sich - ausreichende elektrische Stabilität vorausgesetzt - als Detektor zur Feststellung von Kontaminationen (äußerlich anhaftende Verschmutzungen) mit α -strahlenden Substanzen eignen könnte. Diese Aufgabe lässt sich sonst nur mit speziellen (und teuren!) α -empfindlichen Kontaminationsmonitoren durchführen, die i.d.R. einen Proportionaldetektor als Messkammer besitzen. Da diese nicht mit Luft als Zählgas funktionieren, besitzen solche Geräte eine sehr dünne (α -strahlendurchlässige) Schutzfolie, und müssen trotzdem - z.B. im Zwei-Wochen-Rhythmus - neues Zählgas erhalten (da das bisher vorhandene Zählgas dann durch die extrem dünne Schutzfolie ausdiffundiert ist). Sollte sich die Tauglichkeit des hier beschriebenen Detektionsprinzips erweisen, so wäre das auffallendste Merkmal das geradezu groteske Verhältnis von (minimalsten) Materialkosten zu möglichem ernsthaftem Anwendungsnutzen.





Der fertig zusammengesetzte Prototyp ist immer unter Spannung und damit stets betriebsbereit.

Die eingebauten Batterien wurden in Reihe geschaltet, so dass zur Anwendung kommen:

- $U_{Batt1} = U_{ge-bl} = +9 V$
- $U_{Batt2} = U_{rt-ge} = +1,5 V$
und damit sind
- $U_B = U_{rt-ge} = +1,5 V$
- $U_{AK} \approx U_{rt-bl} = +10,5 V$.



Ein schwerer Mangel ist natürlich die fehlende einheitliche Lackierung (und ein mitreißendes Firmenlogo). Ohne diese könnten übermäßig misstrauische Menschen evtl. beinahe auf die Idee kommen, dass es sich um ein nicht ernst zu nehmendes, selbstgebasteltes Billig-Produkt handeln könnte. Und die uns offenbar inhärente automatische Schlussfolgerung vom getriebenen materiellen Aufwand auf den damit vermutlich möglichen Nutzen könnten zur weiteren (gefühlten) Entwertung des Sensors beitragen.

Wer sich aber nicht durch Äußerlichkeiten vorzeitig abschrecken lässt, kann dagegen auch zum positiven Schluss kommen, dass diese einfache Art von Geräten gut geeignet ist, um grundlegende physikalische Zusammenhänge mit verblüffend kleinem materiellem Einsatz zu demonstrieren. Dies wird ganz besonders die stolzen ErbauerInnen eines solchen Sensors betreffen, die die Metamorphose von zwei Transistoren, zwei Batterien, und einigen Draht-, Blech- und Kunststoffstückchen in ein tatsächlich brauchbares Strahlungsmessgerät unter ihren eigenen Händen erlebt haben.

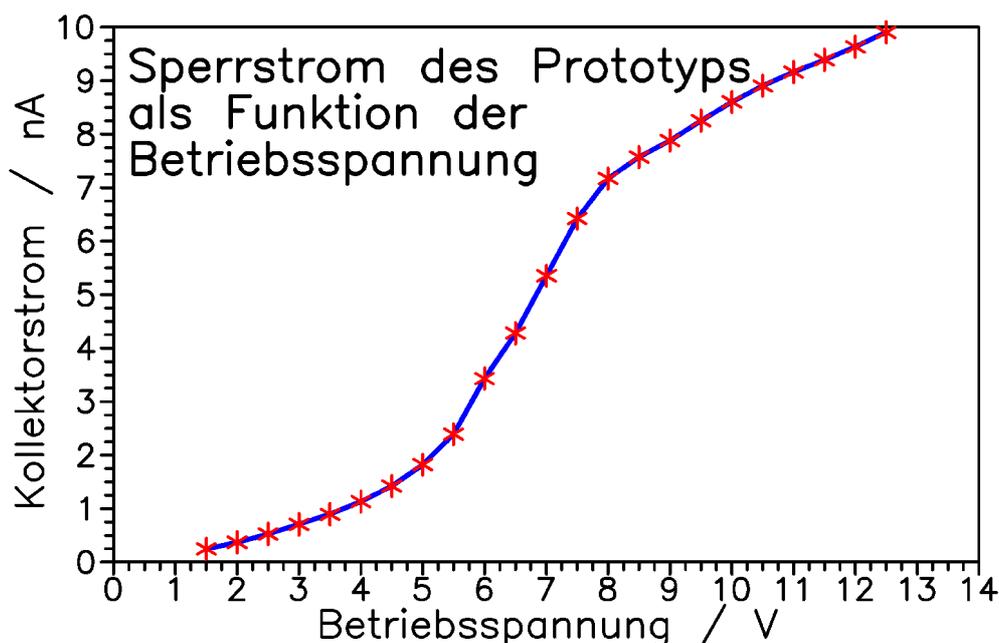
2. Erster Prototyp (LKD#01): Vermessung und Abschätzung der Eigenschaften

Im soweit zusammengebauten Zustand schlägt nun wieder die Stunde des Elektronikers, dessen Aufgabe es ist, die elektrischen Eigenschaften des Prototypen zu untersuchen. **Klar ist zunächst einmal nur, dass die vertrauten typischen Kennwerte der gezeigten Transistoren hier nicht gelten (weil die Eingangsströme im Picoampère-Bereich liegen).**

So können die zu erwartenden Flussspannungen U_F der Basis-Emitterdioden aufgrund der Kleinheit der Basisströme entsprechend der Schottky-Gleichung jeweils nur ca. **200 mV** betragen (und nicht mehr bei den typischen $600\text{ mV} \dots 700\text{ mV}$ liegen, wie sie bei den konventionellen Flussströmen I_F von einigen mA zu erwarten sind). Dies hat zur (sehr erwünschten) Folge, dass das Potential der Anode nahezu identisch ist mit der positiven Betriebsspannung (auf der Leitung rt). Dies erlaubt es (wie bereits oben erwähnt), die Spannung an rt als Guard-Potential zu benutzen.

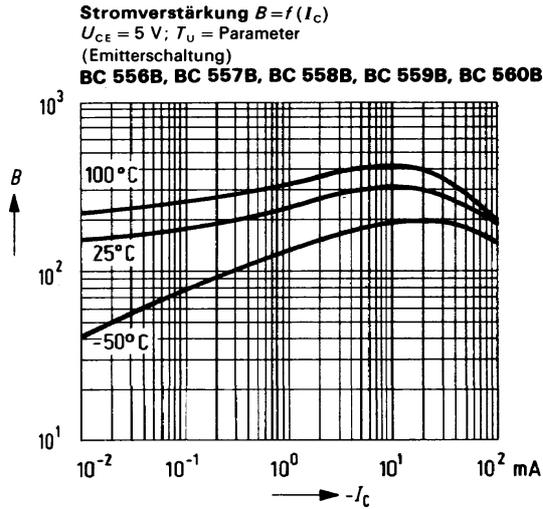
Weiter sieht der elektrische Aufbau die Unabhängigkeit der Kammerplattenspannung $U_{AK} \approx U_{rt-bl}$ von der Verstärker-Betriebsspannung $U_B = U_{rt-ge}$ vor. Der größte Teil von U_{AK} wird zwischen ge und bl angelegt (und muss natürlich während Messungen am Verstärker hoch konstant bleiben). Damit kann der Einfluss beider Parameter unabhängig voneinander untersucht werden.

Das folgende Diagramm gibt das Ergebnis der Messung des Sperrstroms $I_{Sp} = I_{rt-ge} = f(U_{rt-ge})$ der Darlington-Schaltung wieder (mit $U_{BattI} = \text{const.} = +9\text{ V}$, und ohne Bestrahlung):

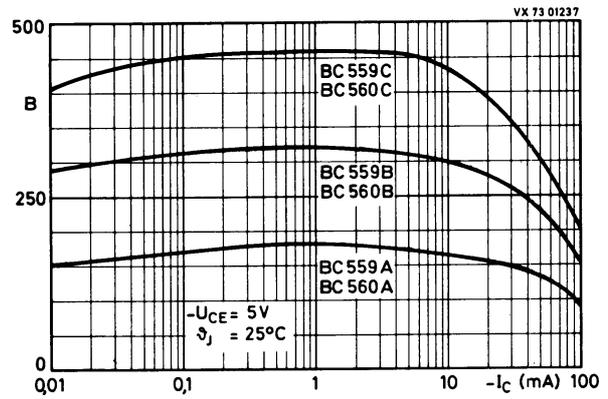


Leider ist der Faktor der statischen Stromverstärkung $B = h_{FE}$ in diesem Betriebsstrombereich unbekannt, so dass nicht abschätzbar ist, ab welcher Bestrahlungsintensität mit welcher Stromzunahme gerechnet werden kann. In den allermeisten Datenblättern der Transistor-Hersteller gibt es keine Angaben für B unterhalb eines Kollektorstroms von $10\ \mu\text{A}$ (!). Die meisten Datenblätter scheinen nur anzudeuten, dass B mit abnehmendem I_C abnimmt; es gibt jedoch auch Angaben über zunehmendes B mit abnehmendem I_C (und auch über konstant bleibendes B). Die nachfolgenden Abbildungen zeigen jeweils diesen (normierten) Parameter aus diversen Datenblättern unterschiedlicher Hersteller dieses Transistortyps. Die absolute Höhe von $B = h_{FE}$ ist zusätzlich gruppierungs- und exemplarabhängig. Zunächst kann der Wert von B folglich nur grob geschätzt (anhand der Grafiken extrapoliert) werden, was offensichtlich unbefriedigend ist.

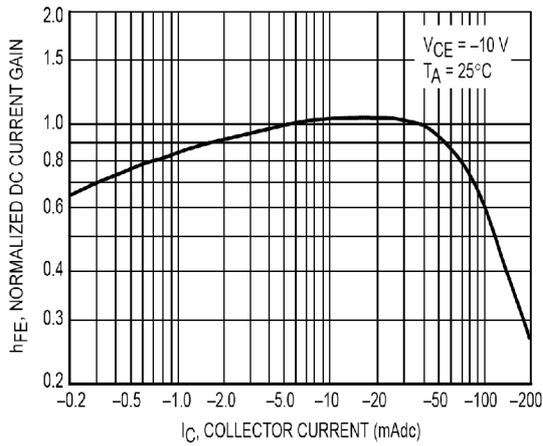
$B = h_{FE}$ als Funktion des Kollektorstroms nach diversen Datenblättern zum BC 560 (3)



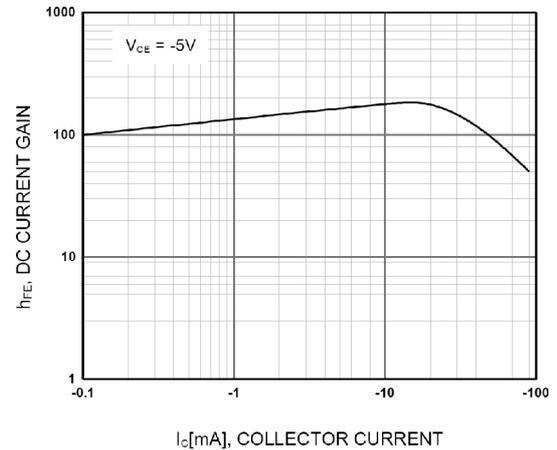
a. Nach: Siemens: Transistoren, 1980/81.



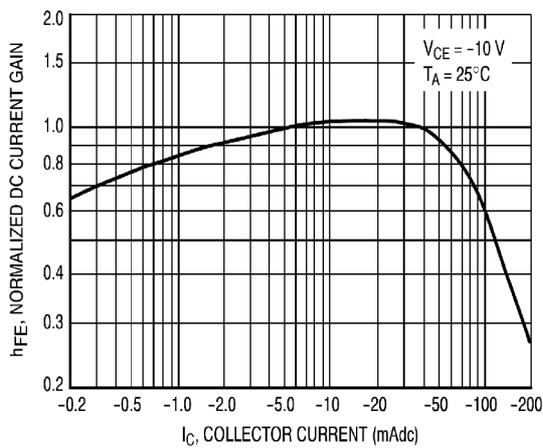
b. Aus: VALVO: Transistoren. 1984.



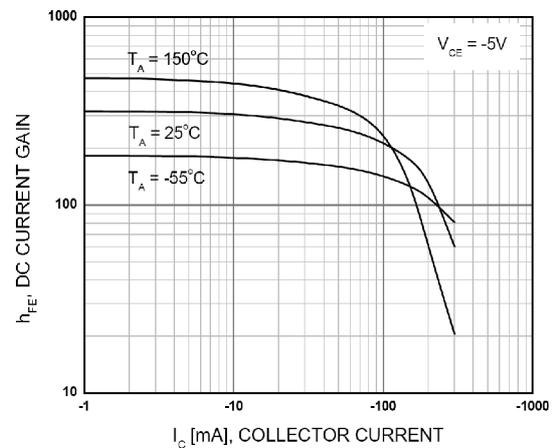
c. Aus: Datenblatt Motorola, 1996.



d. Aus: Datenblatt Fairchild, 2002.



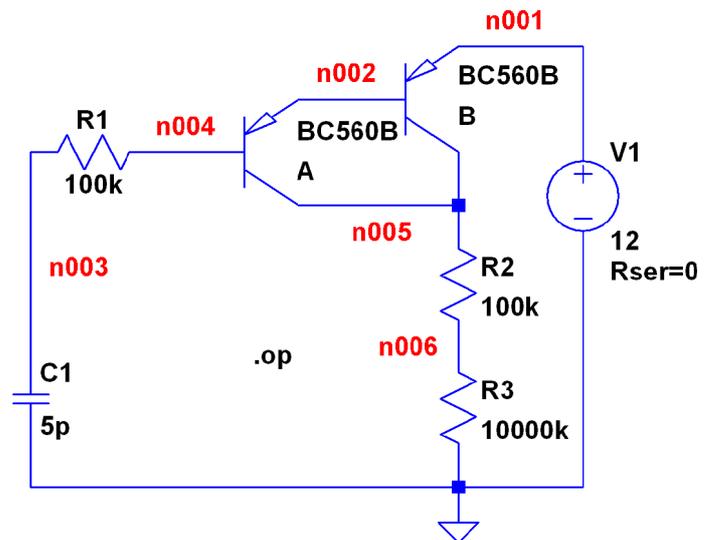
e. Aus: Datenblatt ON Semiconductor, 2012.



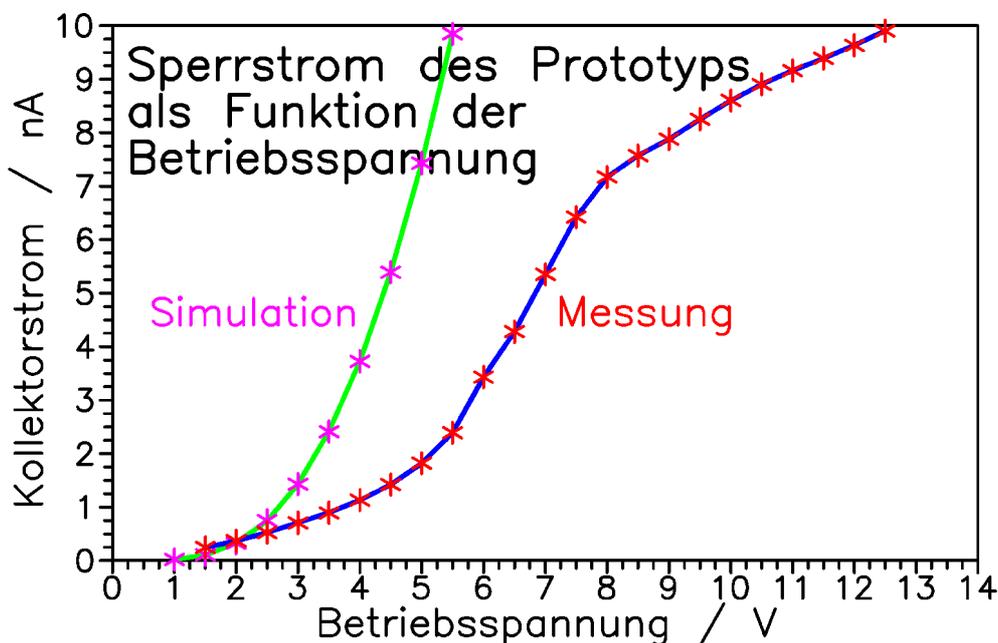
f. Aus: Datenblatt Fairchild, 2016.

Eine alternative Möglichkeit zur umfassenderen Abschätzung des Verhaltens der Schaltung stellt heute die Schaltungssimulation dar. Hierzu wurde das Programm *LTspice IV* der Firma Linear Technology Corporation (4) verwendet.

Die eingegebene Schaltung entspricht genau dem Aufbau, wobei hier der Wert für die Kapazität zwischen Anode und Kathode von $C1 = 5 \text{ pF}$ nur geschätzt wurde, da er für die hier durchgeführte Simulation (**.op** = Operation Point = Arbeitspunkt = Analyse der Gleichspannungen und -Ströme) ohnehin nicht relevant ist. Die roten Angaben **n00X** wurden von Hand in die Skizze nachgetragen; dies sind die Punkte und Bezeichnungen für die von *LTspice* in der Simulation berechneten Spannungen. Für das angeschlossene digitale Vielfachmessgerät wurde $R3 = 10 \text{ M}\Omega$ hinzugefügt. Für die Simulation wurde der Modellierungsdatensatz für Transistoren des Typs BC 560 B des Herstellers *Philips* verwendet (5).



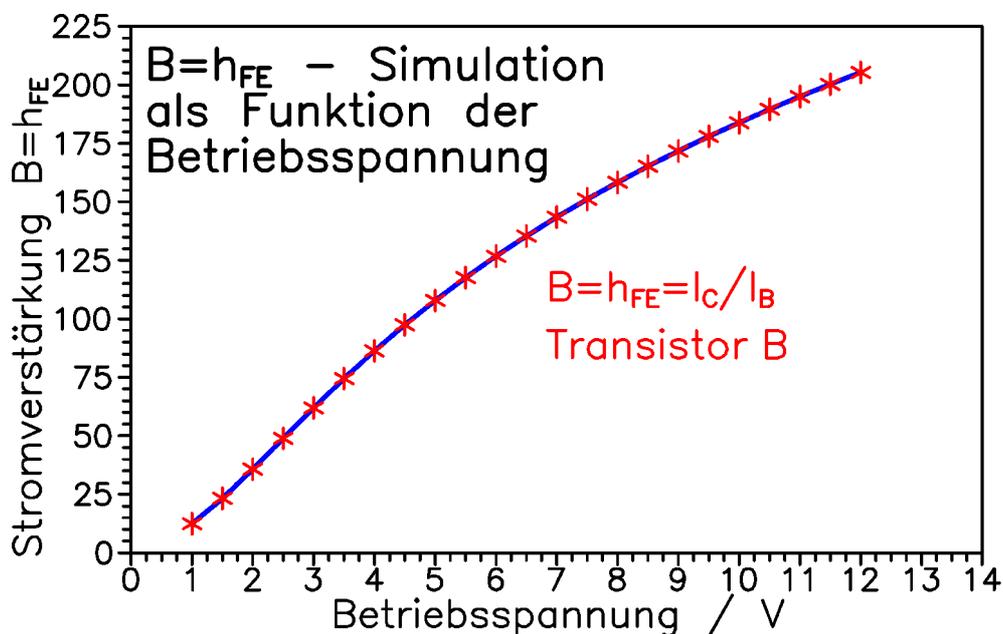
In getrennten Simulationsläufen wurde zunächst für $U_{rt-ge} = V1 = 1 \text{ V}, 1,5 \text{ V}, 2 \text{ V} \dots 12 \text{ V}$ alle Spannungen und Ströme berechnet. Da der Sperrstrom $I_{R2} = I_{R3}$ bereits am Prototyp experimentell aufgenommen wurde, wird folgend zunächst das entsprechende Simulationsergebnis dargestellt.



Wie ersichtlich, gibt es zwischen Realität (beim Einzelstück) und Simulation im Bereich kleiner Betriebsspannungen bis ca. $2,5 \text{ V}$ zwar eine gewisse Ähnlichkeit in den Absolutwerten, spätestens ab ca. 4 V oder 5 V besitzen die Kurvenverläufe aber keine Ähnlichkeit mehr. Bei 12 V geht der gemeinsame Kollektorstrom in der Simulation (hier nicht mit dargestellt) mit dem Wert $76,89 \text{ nA}$ geradezu "durch die Decke", während der gemessene Sperrstrom noch unterhalb 10 nA liegt.

Diese Diskrepanz zwischen Messwerten (am Einzelstück) und Simulation mahnt zur Vorsicht: weder kann und darf offenbar vom Einzelstück auf eine Kleinserie geschlossen werden, noch sollte (zumindest in diesem in Transistorschaltungen selten benutzten Betriebsbereich) besonders großes Vertrauen in die Schaltungssimulation gesetzt werden !

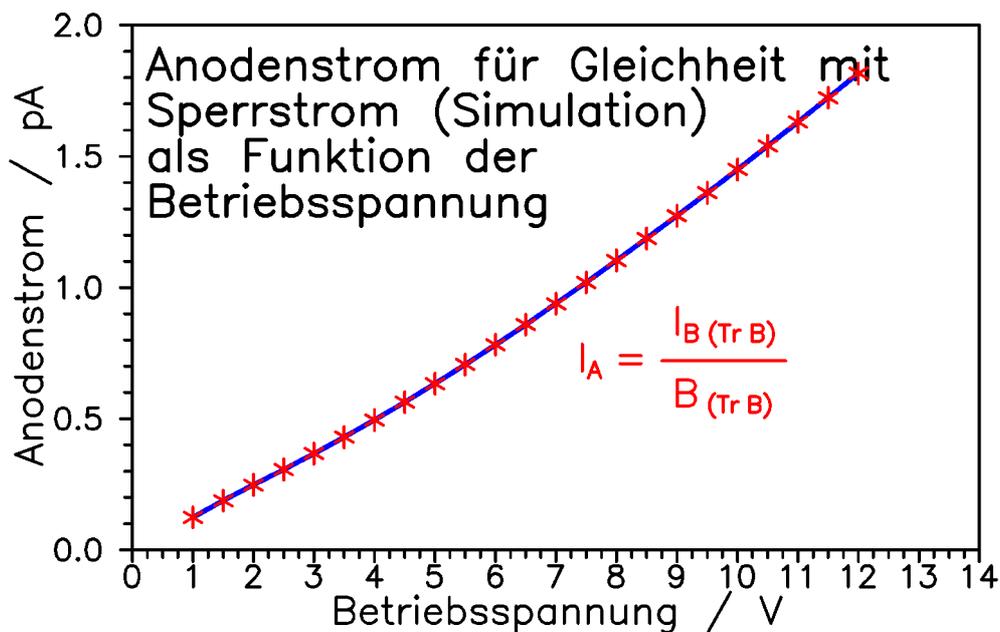
Interessant an den Simulationsergebnissen erscheint die oben offen gebliebene Frage nach dem Betrag des Stromverstärkungsfaktors $B = h_{FE} = I_C / I_B$ der benutzten Transistorart bei sehr kleinen Kollektorströmen, über die die konventionellen Datenblätter keine verlässliche Abschätzung ermöglichen. Dem mit **A** bezeichneten Eingangstransistor wird von der Simulation jeweils ein Strom in dessen (an keinen durchgängigen Leiter angeschlossene) Basis von $I_A \approx 10^{-20} A$ zugewiesen, und der Kollektor- und Emitterstrom sind damit gleich dem Sperrstrom bei offener Basis. Transistor **B** verstärkt aber diesen kleinen Sperrstrom, und damit liegt zumindest ein Anhaltswert auch für den Stromverstärkungsfaktor von Transistor **A** vor (wenn dieser denn einen Basisstrom führen würde, wie er z.B. durch das Aufsammeln von Ionen in der Kammer bei Bestrahlung zustande käme). Aus den Simulationsrechnungen bei verschiedenen Betriebsspannungen ist so der folgend dargestellte Verlauf entstanden.



Da von der Simulation für den Transistor **B** bei Betriebsspannung $12 V$ eine Stromverstärkung von ca. 200 fast wie bei Strömen im unteren mA -Bereich berechnet wird, ist eine Abnahme von B offenbar eher - wie gezeigt - als Funktion der Betriebsspannung zu erwarten als die befürchtete systematische Abnahme als Funktion des Kollektorstroms.

Andererseits ist ganz offensichtlich der Stromverstärkungsfaktor bei der für den Prototyp gewählten Betriebsspannung von $U_{Batt2} = 1,5 V$ mit ihrem erfreulich kleinen Sperrstrom mit gerade mal ca. **25-fach** sehr, sehr mager. Die Darlington-Anordnung würde den Anodenstrom aus dem Nachweis der Ionen in der Kammer also höchstens um den Faktor 625 verstärken.

Der auf der Anode der IOK gesammelte und dann mit beiden Transistoren verstärkte Eingangsstrom ist allerdings in Relation zu setzen zum Sperrstrom der Darlington-Anordnung (ohne Bestrahlung). Diese Grafik gibt, wenn man denn den Simulationsberechnungen glauben mag, den bisher wichtigsten Hinweis auf die untere Detektionsgrenze der Messkammer.



Ein Anodenstrom aus in der IOK gesammelten Ladungsträgern muss, um erkennbar zu sein, nach Verstärkung den stets vorhandenen Sperrstrom der Darlingtonschaltung sichtbar erhöhen. Wenn der verstärkte Anodenstrom gleich dem Sperrstrom ist (der Ausgangsstrom also verdoppelt wird), sollte die Erkennbarkeit schon gegeben sein. **Anders betrachtet stellt dieser Punkt der Gleichheit von verstärktem Eingangsstrom und Sperrstrom eine markante Größe dar**, die offensichtlich optimal ist, wenn der zur Herstellung der Gleichheit benötigte Anodenstrom so klein wie möglich ist.

Trotz der in die obige Grafik eingegangenen mglw. fehlerhaften Simulation des Sperrstroms als Funktion der Betriebsspannung ist ersichtlich, dass der für die Verdopplung des Ausgangsstroms erforderliche Anodenstrom I_A bei kleinen Betriebsspannungen am kleinsten sein dürfte (bei den gewählten 1,5 V ist nach obiger Grafik $I_A \approx 0,2 \text{ pA}$).

Zur Gewinnung eines Eindrucks über die Brauchbarkeit des Prototyps als einfacher α -Kontaminationsdetektor wird nun die Eingangsabschätzung aus diesem Papier fortgesetzt. Eine Anzahl z von in die Messkammer einlaufenden α -Teilchen setzt dort die el. Ladung

$$Q = \frac{W_\alpha \cdot q_e \cdot z}{W_{\text{Ion}}}$$

mit

- W_α = vom α -Teilchen in der Luft der Kammer deponierte Energie
- $W_{\text{Ion}} \approx 34 \text{ eV}$ = je Ionisierungsvorgang in Luft aufgewendete Energie
- $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ = Elementarladung

frei. Wenn diese als Ionen vollständig (ohne Rekombination) getrennt und auf den Elektroden gesammelt wird, steht aus ihr der Anodenstrom

$$I_A = \frac{Q}{t} = \frac{W_\alpha \cdot q_e \cdot z}{W_{\text{Ion}} \cdot t}$$

zur Verfügung. Elementare Umstellung ergibt für die Wirkung der z α -Teilchen je Zeit t :

$$\frac{z}{t} = \frac{W_{Ion} \cdot I_A}{W_{\alpha} \cdot q_e}$$

Diese Ursache z/t kann (bei geeigneter geometrischer Anordnung) verstanden werden als hervorgerufen aus der Kontamination einer Oberfläche, aus der ein gewisser Anteil der emittierten α -Teilchen in das Innere der Kammer gelangt. Da der radioaktive Zerfall isotrop (gleichverteilt in alle Raumrichtungen) erfolgt, werden die allermeisten Teilchen das Detektorinnere nicht erreichen. (Dies ist ein grundsätzliches, rein geometrisches Problem, dass auf alle Kontaminationsdetektoren zutrifft.) Der Anteil k der in einen Raumkegel mit dem Halbwinkel δ ausgesendeten Teilchen beträgt nur

- $k \approx 0,067$ bei $\delta = \pm 30^\circ$
- $k \approx 0,146$ bei $\delta = \pm 45^\circ$
- $k \approx 0,25$ bei $\delta = \pm 60^\circ$
- $k = (1 - \cos \delta)/2$ bei $\pm \delta$.

Weiter ist zu berücksichtigen, dass die (mit Löchern belegte) Detektorfläche des Prototypen begrenzt ist; sie beträgt (ohne vmtl. inaktive Randbereiche) etwa $d = 65 \text{ mm } \emptyset$ und kann damit auf $A_{Det} \approx 33 \text{ cm}^2$ geschätzt werden. In diesem Bereich beträgt der Lochanteil dann (für senkrecht einfallende Strahlung) $\epsilon_{Loch} = 0,488$.

Somit beträgt die bei einem Teilchenfluss in der Kammer z/t anzunehmende Kontamination K :

$$K = \frac{A}{F} = \frac{z}{t} \cdot \frac{1}{k \cdot A_{Det} \cdot \epsilon_{Loch}}$$

bzw.

$$K = \frac{W_{Ion} \cdot I_A}{W_{\alpha} \cdot q_e} \cdot \frac{1}{k \cdot A_{Det} \cdot \epsilon_{Loch}}$$

bei einem Anodenstrom I_A . Nimmt man an, dass

- $W_{\alpha} = 4.000.000 \text{ eV}$ (etwas kleiner als das Maximum, wegen begrenzter Kammertiefe)
- $k \approx 0,146$ (bei $\delta = \pm 45^\circ$)
- $I_A = 0,2 \text{ pA}$ (d.h. I_A soll eine Ausgangsstromverdopplung bewirken)

so folgt:

$$K = \frac{34 \text{ eV} \cdot 0,2 \text{ pA}}{4.000.000 \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \cdot \frac{1}{0,146 \cdot 33 \text{ cm}^2 \cdot 0,488}$$

$$K \approx 4,51 \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2}$$

Die Anwendung eines (vmtl. verbesserten) Prototypen als Kontaminationsdetektor erscheint also durchaus als sinnvolles Einsatzgebiet. Der prinzipielle Vorteil gegenüber konventionellen Geräten läge im Preis, sowie im Betrieb ohne besonderes Zählgas und ohne Schutzfolie.

Die in der obenstehenden Erörterung schon viel benutzte Bezugsgröße, der Sperrstrom der Transistorschaltung ohne Strahleneffekte in der IOK, wird im Bild rechts gemessen. Er liegt hier bei $I_{Sp} = -4 \text{ mV} / 10 \text{ M}\Omega = -0,4 \text{ nA}$. Wie - durch welche Seiteneffekte - überhaupt in der gezeigten Schaltung ein negativer Strom zustande kommen oder zumindest angezeigt werden kann, sei hier zunächst dahin gestellt. Auf jeden Fall wird ja (wie in der umfangreichen Messung als Funktion der Betriebsspannung gezeigt) ein positiver Sperrstrom in der Größenordnung von ca. $0,2 \text{ nA}$ erwartet. Dieser ist temperaturabhängig und verdoppelt sich ungefähr mit jeder Temperaturerhöhung von ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$, wie dies für Halbleiter-Sperrschichten typisch ist. Ein zweiter als deutlich temperaturabhängig bekannter Parameter wäre die Basis-Emitter-Spannung (Flussspannung), deren Änderung sich in der verwendeten Schaltung jedoch nicht messbar auswirkt. Wie die Schaltung zeigt, schwimmt ja die Anode auf ihrem sich einstellenden Potential, und es handelt sich beim Effekt der Ladungssammlung elektronisch gesehen um eine ideale Stromquelle, von der kein Potential vorgegeben wird.



Ein naheliegender und eleganter Funktionstest der Messkammer, auch wenn dieser nicht die Messung einer Kontamination beinhaltet, ist es, einen der bekannten Thoriumhaltigen Glühstrümpfe (wie sie für den Betrieb von Camping-Gas-Lampen verwendet wurden) in die im Bild vorgelegte Dose zu legen und den Gesamtraum luftdicht abzuschließen. Der Glühstrumpf kommt mit der Lochblende der Messkammer nicht in Kontakt, und kann diese somit auch nicht kontaminieren. Aus der Th-232-Zerfallsreihe gast beim Zerfall von Ra-224 im Glühstrumpf ständig das Nuklid **Rn-220** ($t_{1/2} \approx 55,6 \text{ s}$) aus, ein ausschließlich α -Strahlung emittierendes Edelgas, das sich im Gesamtraum der beiden Dosen frei verteilt und dessen Aktivität sich bis zum radioaktiven Gleichgewicht aufbaut. Im Volumen nur der Messkammer befindet sich dann nach etwas Wartezeit eine Aktivität des Edelgases, die knapp der Hälfte der Aktivität des Ra-224 im Glühstrumpf entspricht, zuzüglich einer gleich hohen Aktivität des Zerfallsprodukts **Po-216** ($t_{1/2} \approx 0,15 \text{ s}$) aus dem Rn-220 - Zerfall.



Auf diese Weise kommt die angezeigte Spannung von im Mittel rund 500 mV ($I = 500\text{ mV} / 10\text{ M}\Omega = 50\text{ nA}$) zustande. Bei diesem Spannungswert ist allerdings zu bedenken, dass er die Betriebsspannung der Darlingtonschaltung (im Beispiel bis auf ca. 1 V) verkleinert, und damit auch deren Eigenschaften verändert (z.B. wird der Stromverstärkungsfaktor $B = h_{FE}$ der Darlingtonschaltung (laut Simulation) damit auf etwa das 0,29-fache verkleinert!). **Da diese Möglichkeit schon bei dieser einfachen explorativen Messung aufscheint, ist die Auswerteschaltung vor einem möglichen ernsthaften Messeinsatz unbedingt so erweitern, dass der von der Darlingtonschaltung ausgegebene Strom seine eigene Betriebsspannung nicht verändert.** Die Lösung kann z.B. sein, die Darlingtonschaltung auf einen I/U -Verstärker (Transimpedanzverstärker) mit seinem konstanten Eingangspotential arbeiten zu lassen, und das entkoppelte Signal von dessen Ausgang zu nutzen.

Das nebenstehende Bild zeigt einen einzelnen momentanen Messwert während des Abklingens der Rn-220-befrachteten Luft in der Messkammer im Anschluss an den vorstehend beschriebenen Test.



Der oben skizzierte Mangel legt den Verdacht auf eine systematische Nichtlinearität des LKD#01 nahe. Um diese Möglichkeit zu demonstrieren oder zu widerlegen, wird wie folgt vorgegangen:

1. Die Messkammer wird - wie im vorher beschriebenen Versuch - durch Vorlegen einer Dose mit darin befindlichem Glühstrumpf mit Radon-220 - haltiger Luft befüllt ($t_{1/2} \approx 55,6\text{ s}$). Ab dem gemeinsamen Luftabschluss baut sich die Aktivität A im Innenraum mit der Zeit t auf nach einer Exponentialfunktion des Typs

$$A = A_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{1/2}}}\right),$$

d.h. die Aktivität (und damit der Messstrom) nähert sich immer mehr dem Endwert A_{∞} an.

2. Nach einer sinnvollen Wartezeit von z.B. 5 Zeitkonstanten wird die Glühstrumpfdose entfernt und der Sensor rasch (damit wenig Luftaktivität entweicht) mit einem Plastikdeckel verschlossen. Die in der Messkammer verbliebene Aktivität $A_0 < A_{\infty}$ zerfällt nun mit der Halbwertszeit $t_{1/2}$ des Strahlers. Die Ausgangsspannung des Sensors wird im Sekundentakt gemessen und $t_{1/2}$ wird aus dem Zeitverlauf bestimmt. Der Absolutwert der erreichten A_0 ist dabei unkritisch.

3. Zeigt der anschließende Zeitverlauf der abklingenden Aktivität eine monoexponentiell abnehmende Exponentialfunktion vom Typ

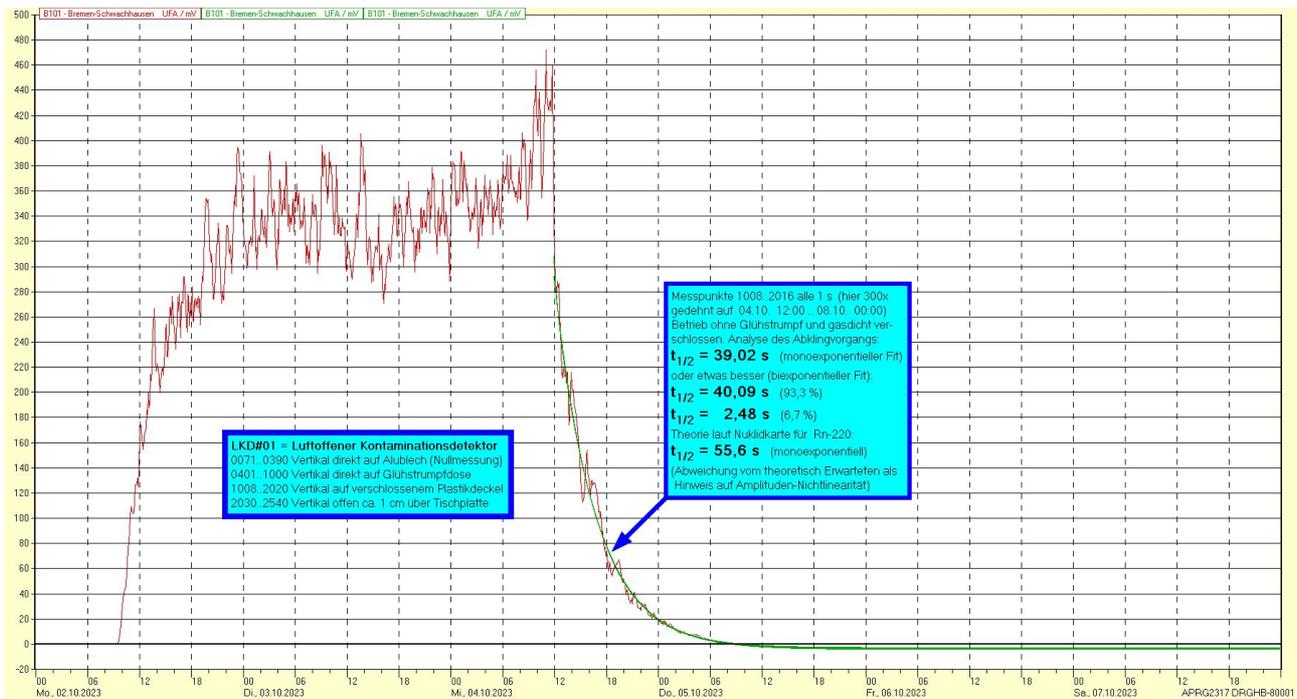
$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

mit der erwarteten Halbwertszeit des Radon-220, so arbeitet die Messkammer linear. Je mehr die analysierte Zeitkonstante hingegen vom theoretisch erwarteten Wert abweicht, und je mehr sich die Abklingkurve als bi- oder gar multiexponentiell herausstellt, um so deutlicher ist der Sensor nichtlinear. Das folgende Bild zeigt den Versuchsaufbau, wobei das gezeigte Multimeter (Type Uni-Trend UT71D) zur Aufnahme der Spannungswerte aus dem Sensor im Zeitraster von 1 s eingestellt war.



Das folgende Bild zeigt die bei diesem Test aufgenommene und analysierte Messdatenkurve.

Da das verwendete Analyseprogramm in der aktuell vorliegenden Form auf die Verarbeitung von Messdaten im Zeitraster von 5 Minuten = 300 s fest fixiert ist, wurde der Zeitmaßstab vor dem Einlesen in das Programm hier um den Faktor 300 gestreckt, und die erhaltenenen Abklingzeitkonstanten nach der Exponentialanalyse um denselben Faktor wieder gestaucht.



Die **rote** Kurve zeigt die Sensorausgangsspannung (Messgröße *UFA* in *mV*), deren Proportionalität zur in der Messkammer befindlichen Aktivität untersucht werden soll.

Dass der Aktivitäts**aufbau** nicht wirklich dem theoretisch zu erwartenden Zeitverlauf entspricht (unerwartete Nichtzunahme von *UFA* in der zweiten Hälfte des Aufbaus der Kammerspannung), mag an einem unvollkommenen Luftabschluss zwischen den beiden Dosen liegen, und ist hier nicht relevant. Ab dem manuell vorgenommenen Verschluss der Messkammer mit einem Plastikdeckel bei Messpunkt 1008 (entsprechend dem fiktiven Zeitpunkt Mi., 04.10., 12:00) zeigen die im rechts eingeblendeten blauen Kästen wiedergegebenen Analyseergebnisse aus der Anpassung der **grünen** Exponentialkurven an die Messdaten aber ganz erhebliche Abweichungen vom idealerweise erwarteten, theoretischen Kurvenverlauf. Dies betrifft sowohl die "gemessene" Halbwertszeit an sich, als auch das Auftreten einer zusätzlichen, kürzeren "Abnahmezeitkonstante", die das reale Radon-220 nicht besitzt.

Der erste Prototyp des LuftoffenenKontaminationsDetektors zeigt also wirklich erhebliche Nichtlinearität, die beseitigt werden soll, zumal dies technisch einigermaßen leicht möglich zu sein scheint.



An dieser Stelle schien es nahe zu liegen, den ersten Prototypen teilweise zu demontieren, und um die angedachte Schaltung (den *I/U*-Verstärker) zum zweiten Prototypen zu ergänzen. Allerdings wäre ein Vergleich der Eigenschaften bzw. die Analyse der erhofften Verbesserungen gegenüber dem ersten Entwurf dann evtl. nicht mehr möglich, weil dieser nicht mehr existierte.

Auch wenn es dem Autor umständlich und lästig erschien, wurde daher ein zweiter Prototyp von Grund auf erstellt. Gegenüber dem ersten Entwurf wurden nur wenige Änderungen vorgenommen:

- um die Linearität zu verbessern
- um die Ansprechempfindlichkeit weiter zu erhöhen (und damit die Grenzen der Anwendbarkeit des Messprinzips auszuloten).

Diese Änderungen werden im Folgenden im Detail beschrieben und diskutiert. Die Grundkonstruktion (die Gehäusestruktur auf der Grundlage von Erdnussdosen) wurde dabei beibehalten.

3. Zweiter Prototyp (LKD#02): Entwurf und Aufbau

Der zweite Prototyp soll dieselbe grundsätzliche Konstruktion und im wesentlichen denselben Eingangsteil wie der erste Entwurf besitzen, ohne jedoch dessen bereits diskutierte elektronische Unzulänglichkeiten zu wiederholen. Im einzelnen sollen für das verbesserte Modell also direkt übernommen bzw. nahezu identisch nachgebaut werden:

- der Aufbau in einer Konservendose identischer Größe und Ausführung
- die Eingangsstufe mit ihrer mechanischen und elektrischen Dimensionierung
- die elektromechanische Guard-Konstruktion des ladungssammelnden Teils.

Dagegen sollen aufgrund der gemachten Erfahrungen folgende Änderungen realisiert werden:

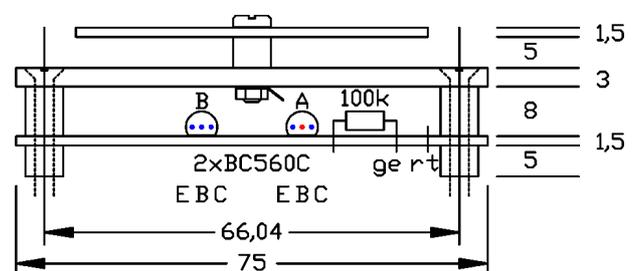
- größere Strahlendurchlässigkeit der Abdeckplatte (Erhöhung von Lochfläche und Lochdichte)
- Benutzung derselben Standard-Type von Kleinsignal-Transistoren in der Eingangsstufe, jedoch innerhalb dieser Type solche der höchsten Stromverstärkungs-Klassifizierung (BC 560 C)
- klare Trennung von ladungssammelnder Eingangsstufe und folgender Signalauswertung
- Betrieb der Transistorstufe unter konstanten elektrischen Bedingungen (Vermeidung der negativen Rückwirkung der gemessenen Strahlenintensität auf die elektronische Verstärkung), durch ...
- Benutzung eines auf die Eingangsstufe folgenden I/U - Verstärkers (Transimpedanzverstärker) mit seinem konstanten Eingangspotential, sowie
- nachfolgend Einsatz eines Differenzverstärkers, für ein ...
- einheitliches Nullpotential für mechanischen Aufbau, Verstärkerschaltung, Signalausgang.

Um ggf. echte Vergleichsmessungen vornehmen zu können, wurde der zweite Prototyp vollständig neu erstellt und das erste Exemplar in seinem (oben in diesem Papier) beschriebenen Originalzustand belassen. Mit dem Bau der mit dem ersten Prototypen identischen Eingangsstufe, jedoch unter Verwendung anderer Transistor-Individuen, soll gleichzeitig ein Eindruck von der Reproduzierbarkeit der Eigenschaften der Eingangsstufe gewonnen werden.

Das Bild rechts illustriert die wenigen vorgenommenen Änderungen der Eingangsstufe an der vorherigen Konstruktion (vgl. S. 4):

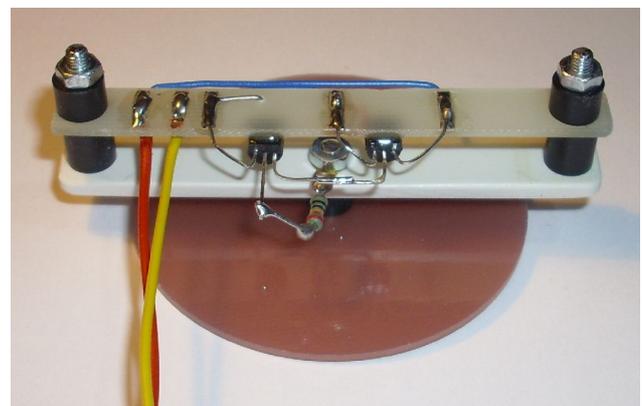
1. Es werden nun Transistoren der höchsten Stromverstärkungs-Klassifizierung verwendet (BC560C anstelle von BC560B)

2. Für die auf Guard-Potential befindlichen Befestigungsschrauben wurden Senkkopfschrauben (M3x23) anstelle von Zylinderkopfschrauben verwendet, um den Abstand zur Sensorplatte noch geringfügig zu vergrößern und die unerwünschte ladungssammelnde Konkurrenz zur Detektorplatte weitmöglichst zu verkleinern.



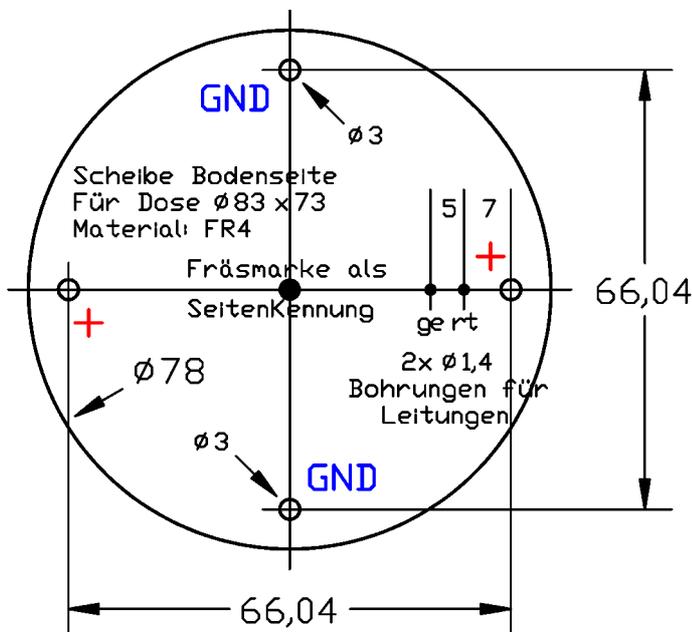
Ansonsten ist der Aufbau identisch mit dem beim LKD#01. Aus den bisher gesammelten Erfahrungen ergeben sich für evtl. spätere Exemplare nur noch die folgenden Ideen:

- die gedruckte Platine könnte noch etwas besser an die Konstruktion angepasst sein
- die zum Bodenblech zeigenden 5-mm-Distanzhülsen könnten aus Epoxidmaterial bestehen und mit der Platine verklebt sein
- der Gesamtaufbau könnte noch etwas flacher (weniger hoch) konstruiert werden.



Die angedeuteten Senkkopfschrauben sind - wie beim Vorläufer-Modell - durch größere Loch-Durchmesser vom Dosenboden isoliert und befinden sich auf Guard-Potential +; die genaue Lochposition wird von der mit dem Dosenboden verschraubten Isolierplatte vorgegeben (Maßskizze und Foto vgl. unten).

Die in der Skizze mit **GND** markierten M3-Verschraubungen übertragen das Massepotential des Dosenbodens auf den (auf den nächsten Seiten abgebildeten) Prinzipaufbau mit der weiteren Elektronik und der Stromversorgung, der von einer zweiten Konservendose umgeben ist und von dieser hervorragend abgeschirmt wird.



Die Befestigungsbohrlöcher in dieser Epoxid-Scheibe besitzen alle denselben Durchmesser von 3 mm und müssen (ebenso wie die beiden kleineren Bohrungen für die Leitungen) exakt in dieser Anordnung und Größe auch in den Boden der Messdose übernommen werden. Hierbei sind Scheibe und Dose durch jedes einzelne neu vorhandene Bohrloch sofort mit M3-Schraubverbindungen zu fixieren, denn die Maßgenauigkeit (Übereinstimmung der Lage der Bohrungen in Epoxidscheibe und Dosenboden) ist außerordentlich kritisch! Daher enthält die Epoxidscheibe auch unbedingt z.B. in ihrem Mittelpunkt die eingezeichnete Fräsmarke, anhand derer die Orientierung der Scheibe auf dem Dosenboden jederzeit wiederhergestellt werden kann.

Wenn Scheibe und Dosenboden bereits irrtümlich eine weitere Bohrung erhalten haben - wie beim hier rechts gezeigten Exemplar im Mittelpunkt - so kann und sollte diese mit einer weiteren Schraubverbindung fest und luftdicht verschlossen werden. **Es ist (z.B. für die späteren Testmessungen) essentiell, dass die eigentliche Messkammer durch frontseitiges Aufsetzen eines Kunststoffdeckels luftdicht verschließbar ist.**

Erst wenn alle Bohrungen in Scheibe und Dosenboden wie gezeigt und korrekt und genau (!) vorgenommen wurden, werden die mit + markierten Löcher - **nur im Dosenboden, und nicht in der Epoxid-Scheibe!** - auf einen Durchmesser von z.B. 5,5 mm aufgebohrt. Die das Guard-Potential zum Sensor übertragenden Senkkopfschrauben M3x23 werden damit durch die Löcher in der Epoxidscheibe zwangsgeführt und vom Bodenblech auf Abstand gehalten, und so von diesem isoliert, vgl. das folgende Bild.

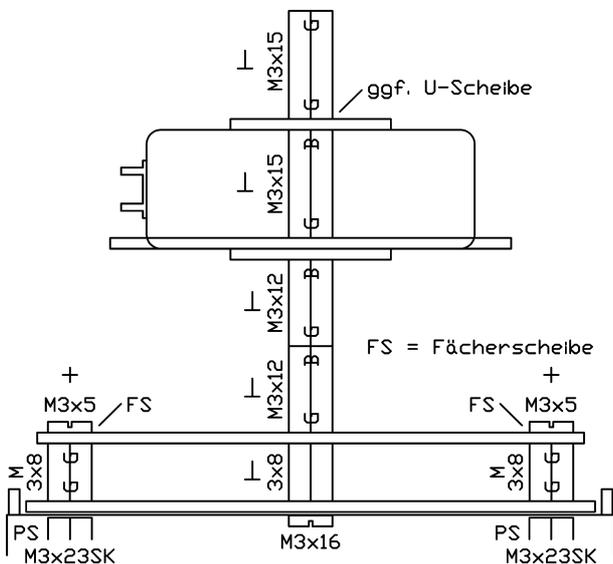




Die besondere Betonung, die hier auf die Beschreibung der Ausführung der Bohrungen im Boden der Messkammer gelegt wird, ergibt sich aus der möglichen Konsequenz:

Eine evtl. Berührung dieser Schrauben mit dem Bodenblech würde einen vollständigen Kurzschluss für die Reihenschaltung aus den beiden 9 V - Batterien bedeuten!

Auf der Rückseite der Messdose ist mit vier Abstandshaltern der kleine auf dem Bild links skizzierte Aufbau montiert.



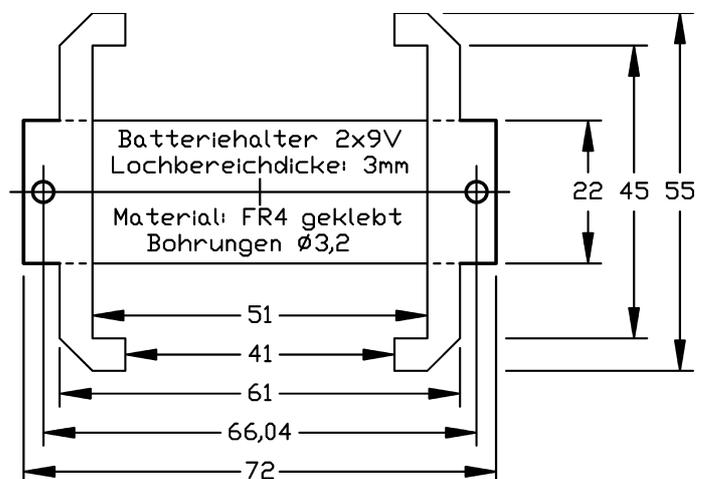
Die Schnittzeichnung deutet zuunterst wieder den verstärkten Zwischenboden an, unter dem die Eingangsstufe befestigt ist.

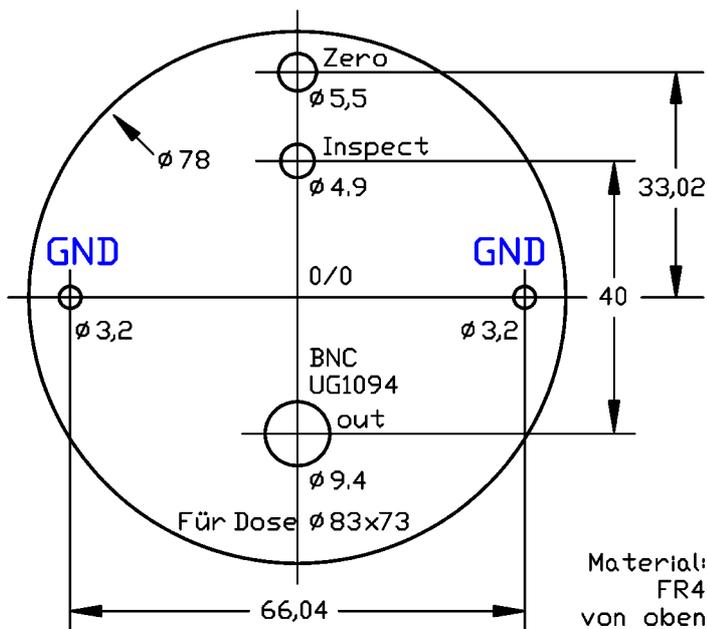
Bei den mit Maßen (3x8 bzw. M3x8 usw.) bezeichneten Konstruktionselementen handelt es sich um Abstandshalter (Distanzrollen bzw. Gewindebolzen) aus Messing. Erstere besitzen eine durchgängige Bohrung, letztere ein Innengewinde G oder einen herausstehenden Gewindebolzen B am jeweils bezeichneten Ende. Die zweite Abschirmdose wird mit den beiden nach oben weisenden, auf Massepotential liegenden Gewindebolzen verschraubt (der hintere Teil des Aufbaus wird in der Skizze durchgängig vom vorderen verdeckt).

Die 8 mm über der Bodenplatte befindliche

Epoxidplatine trägt die neu hinzugekommene signalumsetzende Elektronik.

24 mm darüber befindet sich die einfache Konstruktion aus zwei Epoxidteilen, von denen der untere Teil hier rechts abgebildet ist. Zwischen diesem, sowie dem oberen Teil (einem einfachen Epoxidstreifen von 22 mm x 72 mm mit den zwei Bohrungen im Abstand 66,04 mm) sind zwei 9 V - Blockbatterien (Dicke: 16,5 mm) eingeklemmt. Eine zusätzlich notwendige 1,5 V - AAA-Zelle ist im Deckelbereich fixiert.



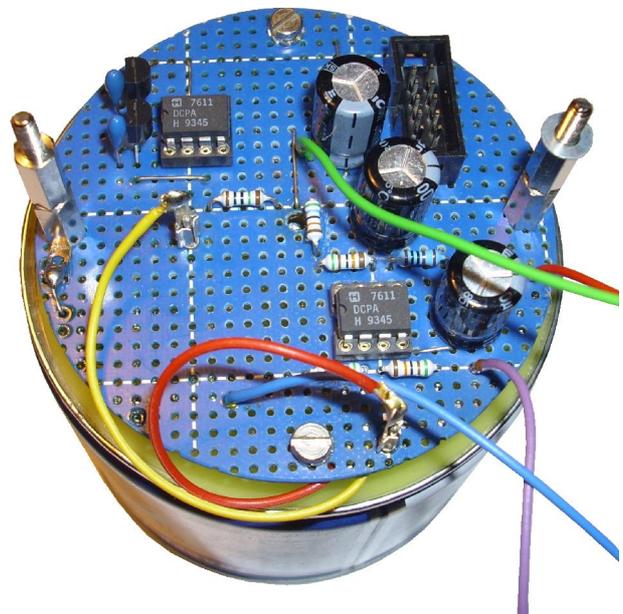


Die links skizzierte Scheibe aus FR4 ist außen auf den Boden der zweiten Abschirmdose aufgelegt, um dem Dosenboden mit seiner Blechdicke von nur $0,2\text{ mm}$ zu etwas mehr mechanischer Stabilität zu verhelfen. Die Befestigung am oben skizzierten kleinen Aufbau aus Abstandhaltern erfolgt durch Verschraubung durch die beiden mit **GND** bezeichneten Bohrungen, die der abschirmenden Dose zugleich ihr Potential zuführen.

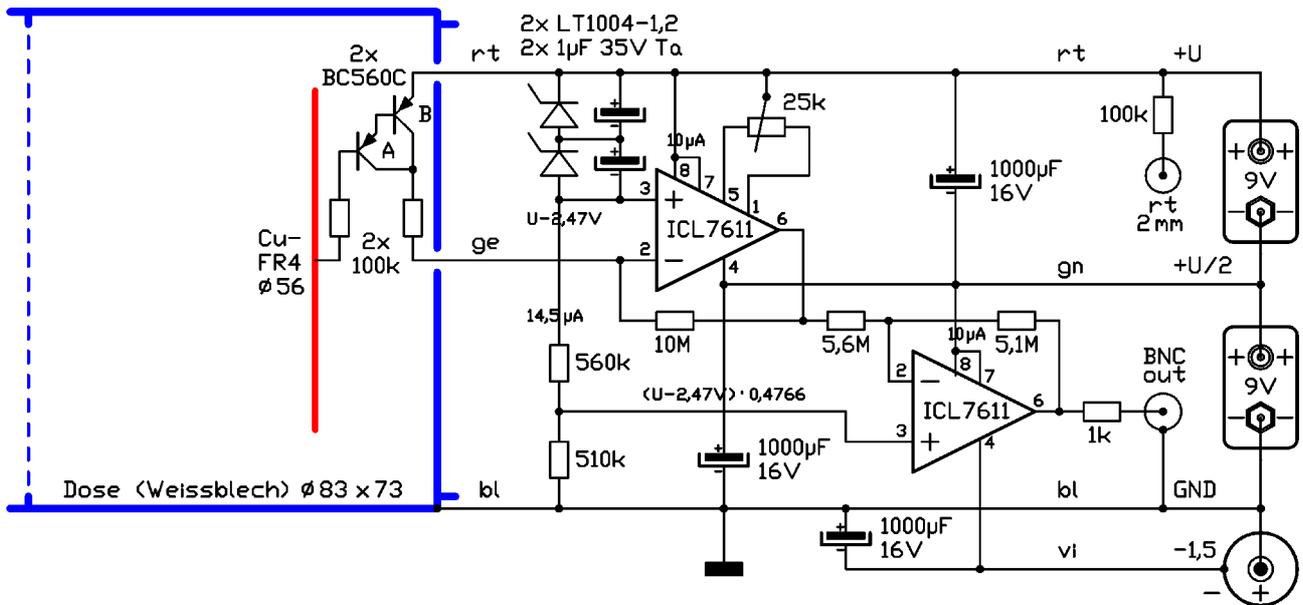
Diese Bodenplatte enthält ein Präzisions-Trimpotentiometer zur Nullstellung der Ausgangsspannung bei Nichtbestrahlung (Zero), eine rote 2 mm -Buchse zur Kontrolle der Batteriespannung (Inspect), sowie die BNC-Buchse mit der Ausgangsspannung.



Die zusätzliche Elektronik birgt für Insider zwar keine großen Geheimnisse, wurde aber dennoch - wegen des immer noch experimentellen Status des Sensors - manuell auf einem Stück Experimentierplatine realisiert. Über den 10pol. Pfostensteckverbinder laufen die Leitungen zu den rückwärtigen Bedienelementen.



Die aus dem Bild herausführenden farbigen Leitungen führen zu den über dieser Schaltung angeordneten Batterien. Die vollständige Schaltung des zweiten Prototypen mit der neu entwickelten Elektronik zur Umsetzung der aufgelisteten Veränderungen ist folgend wiedergegeben. Da es sich nur um eine einfache, analytisch leicht zu berechnende Standardschaltung aus zwei Operationsverstärkern handelt, konnte auf die Durchführung einer Schaltungssimulation verzichtet werden.



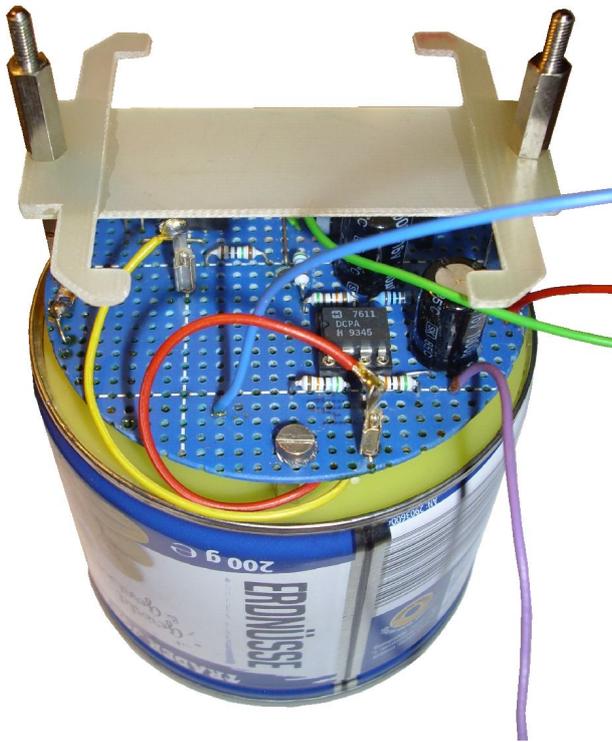
Der auf die Eingangsstufe folgende Operationsverstärker ICL 7611 (ein Typ mit niedrigem Ruhestromverbrauch, CMOS-Eingängen und kleinsten Eingangsströmen) ist als Transimpedanzverstärker (I/U-Verstärker) geschaltet, dessen Potential am invertierenden Eingang stets ca. $2,47\text{ V}$ negativer ist als die positive Betriebsspannung (hervorgerufen durch die beiden in Reihe geschalteten Bandgap-Referenzelemente des Typs LT 1004 - 1,2 am nichtinvertierenden Eingang). Damit arbeitet die Eingangsstufe stets bei dieser konstanten Betriebsspannung, und eine Variation der Stromverstärkung der Eingangstransistoren durch veränderte Betriebsspannung ist nicht mehr möglich.

Die Abhängigkeit des Pegels der Ausgangsspannung des eingangsseitigen OPs von der Batteriespannung wird eliminiert, indem der ausgangsseitige Operationsverstärker (auf dem Foto der Platine rechts vorne gelegen) die pegelabhängige Eingangsspannung als Subtrahierverstärker von der als Referenz benutzten Spannung abzieht. Außer seiner Differenzverstärkung von $510\text{ k}/560\text{ k} \approx 0,911$ vollzieht der Ausgangs-OP damit eine Pegelwandlung und erzeugt an seinem Ausgang aus dem (auf Anteilen der Batteriespannung) schwimmenden Potential die gewünschte massebezogene, linear mit der Bestrahlung ansteigende Ausgangsspannung (im Bereich $0\text{ V} \dots 5,9\text{ V}$). Der Proportionalitätsfaktor des gesamten Sensors kann bei Bedarf durch Änderung des Widerstands in der Rückführung des eingangsseitigen OPs angepasst werden (hier bisher vorgesehen: $10\text{ M}\Omega$ (wie im LKD#01)). Da die Input-Biasströme der OPs mit (typisch) wenigen μA spezifiziert sind, sollten Rückführungswiderstände bis $100\text{ M}\Omega$ oder sogar darüber keine Probleme verursachen. Damit kann die Gesamtverstärkung ohne Nachteile noch um einen Faktor von mindestens 10 weiter erhöht werden.

Auf einen Ein-/Ausschalter für die Versorgungsspannung wurde wieder verzichtet, da jede Batterie mit nur ca. $26\text{ }\mu\text{A}$ belastet wird. Bei einer typischen Batteriekapazität von 600 mAh ergibt sich dadurch ohne Ausgangslast eine theoretische Betriebsdauer von 23.000 Stunden bzw. 2,63 Jahren, was schon derselben Größenordnung nahe kommt wie die Selbstentladezeit der Batterien. Der Stand der Batteriespannung kann im Zweifel über die vorgesehene Buchse (gegen Masse) kontrolliert werden. Der Hauptvorteil beim Verzicht auf den Ein-/Ausschalter liegt in der Eliminierung der sehr langen Umladezeit der Anode, die bei jeder Änderung der Betriebsspannung auftritt.

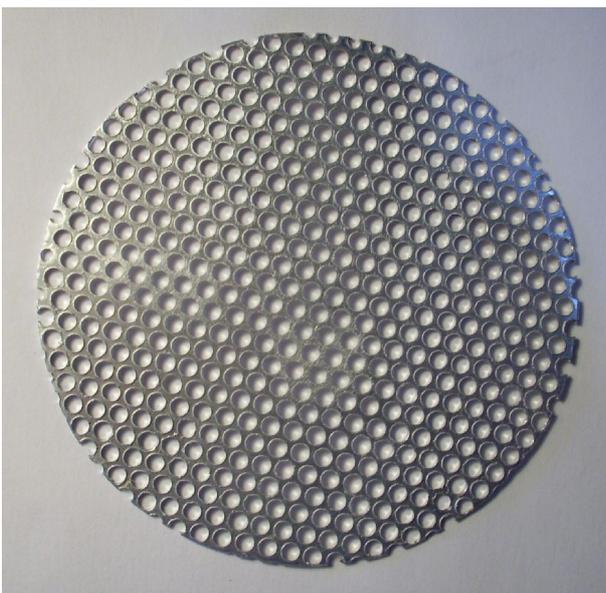
Die Reihenschaltung der beiden 9 V -Blockbatterien erhöht die Betriebsspannung der eigentlichen Ionisationskammer hier auf knapp 18 V . Die zusätzliche $1,5\text{ V}$ -Zelle erlaubt dem Ausgang auch leicht negative Spannungen, wie sie durch Rauschen sowie bei der Nulljustierung auftreten.

Während Messungen mit dem LKD#02 darf der Ausgang BNC_{out} nicht mit wechselnden Lasten be-



aufschlagt werden, da die Batterien im Detektor auch als Quelle der Anodenspannung benutzt werden (deren Änderungen damit direkt auf die Eingangsstufe rückwirken!!!)

Als Schutz gegen in die Kammer eingreifende elektrische Gleich- und Wechselfelder wird die abgebildete Frontscheibe bei diesem Modell aus einem Stück blanken Aluminium-Rundlochblechs verwendet, wie es in div. Baumärkten angeboten wird:



- 500 mm · 250 mm · 0,8 mm (0,22 kg)
- Loch-Ø d = 2 mm, Lochabstand h = 3,5 mm
- Lieferant: GAH Alberts - Gust. Alberts Gmbh, Blumenthal 2, D-58849 Herscheid
- EAN 4004338464240
- Erhältlich (2021-08) z.B. bei:
 - Bauhaus 464240: 9,50 €
 - Hornbach 7566022: 9,95 €
 - OBI 7806649: 9,99 €

Die Löcher wurden manuell auf d = 2,7 mm aufgebohrt und bieten damit einen Lochanteil von $n = 0,54$ (= Durchlässigkeit 54 %). Die Befestigung am vorderen Teil der Messdose erfolgt mit zwei kleinen M2,5-Gewindeklötzchen.



Im Bild oben ist die Lochblechscheibe noch mit zwei M2,5-Zylinderkopfschrauben an diesen Gewindeklötzchen befestigt, was beim Aufstapeln der Bodenseite einer weiteren Dose mechanisch stört (dies ist der Fall, wenn die aufgestapelte Dose z.B. einen Probenraum bereitstellen soll).

Im Bild rechts ist die Lochblechscheibe dagegen mit zwei M2,5-Senkkopfschrauben befestigt, womit die mechanische Unebenheit auf der frontseitigen Lochblechscheibe behoben ist. Hierfür müssen die am Dosenrand verschraubten Gewindeklötzchen eine passende Senkung erhalten. Die ebenfalls erforderlichen Senkungen in der Lochblechscheibe können mit einem selbsthergestellten Sickenwerkzeug improvisiert werden (Bild unten). Als Stempelwerkzeug wird eine M2,5-Senk-schraube benutzt.

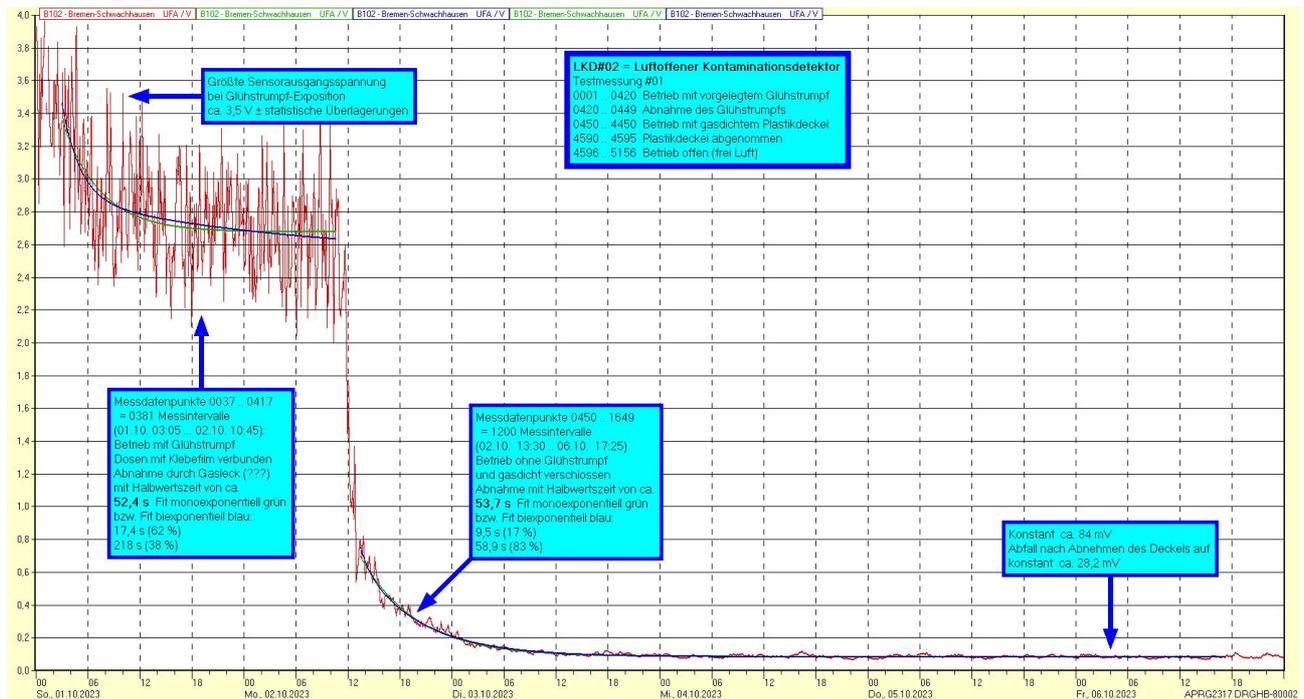


4. Zweiter Prototyp (LKD#02): Vermessung und Abschätzung der Eigenschaften

Die Eingangsschaltung (Darlingtonschaltung aus zwei Kleinsignaltransistoren samt ihrem Aufbau) ist grundsätzlich identisch mit der des LKD#01 und erfordert hier zunächst keine neue Diskussion. Es kann daher gleich mit der Untersuchung des Messkammerverhaltens bei Betrieb mit Radon-220-befrachter Luft eingesetzt werden. Wie gezeigt, wurde die im Foto zuunterst gezeigte Dose (die den Glühstrumpf enthält) in diesem ersten Versuch mit Klebefilm am Sensor befestigt, um die höchstmögliche Konzentration von Radon-220 im Messvolumen zu erreichen.



Die folgende Abbildung zeigt mit der **roten** Kurve den Zeitverlauf der Sensor-Ausgangsspannung (Messgröße UFA in V), sowie mit den **grünen** Kurven den optimiert angepassten Zeitverlauf einfacher Exponentialfunktionen, und mit den **blauen** Kurven die Anpassung biexponentieller Exponentialfunktionen bei dieser ersten Messung (es gelten dieselben Umstände bzgl. Zeitstreckung und Stauchung des Ergebniswertes wie bei der abschließenden Untersuchung des LKD#01).



Im Vergleich mit dem LKD#01 zeigt sich zunächst, dass das Ansprechvermögen mit dem neuen Sensor offenbar ungefähr um einen Faktor 10 verbessert ist, denn die Sensorausgangsspannung (in der bisher einzig erprobten, definierten Bestrahlungssituation (mit dem Glühstrumpf)) ist etwa um diesen Faktor größer. Dies liegt sicherlich mit am Betrieb der Darlington-Eingangsstufe mit 2,47 V anstelle von 1,5 V (zu erwarten ist nach der Grafik auf Seite 13 ($B = h_{FE}$ - Simulation als Funktion der Betriebsspannung) etwa eine Zunahme von B um einen Faktor 2 je Transistor). Zum anderen wurden ja beim LKD#02 Transistoren der höchsten Stromverstärkungsclassifizierung verwendet, so dass $B = h_{FE}$ je Transistor hierdurch noch einmal einen Faktor von z.B. 2 höher sein müsste (Mittelwert über viele Transistorexemplare; im Einzelfall stark exemplarabhängig). Andererseits wird die Signalstärke im LKD#02 im Zuge der Pegelumsetzung mit dem Subtrahierverstärker auch leicht geschwächt (Faktor 0,911).

Wodurch im Versuch die im Bild deutlich sichtbare Abnahme der Sensorausgangsspannung **vor** der Entfernung der Glühstrumpfdose zustande gekommen sein mag, muss zuerst einmal offen bleiben. Der Autor mutmaßt hier ein aufgetretenes, konstantes Leck an der Verbindungsstelle von Klebefilm und Dose(n), d.h. eine Unvollkommenheit der manuell herbeigeführten Versuchsbedingung.

Für die Vorgänge der Entfernung der Dose und des Verschließens des Sensors mit dem Plastikdeckel wurde danach mit ca. 30 s viel länger gebraucht als vorgesehen; es zeigte sich, dass die Entfernung des benutzten Klebefilms anstelle des einfachen Auseinanderlegens der Dosen unpraktisch viel Zeit erfordert (in der bis zum Verschluss durch Auflegen des Plastikdeckels schon ein Großteil der Aktivität aus der Messdose entflucht ist). Aus dem Abklingen der Restaktivität ab Messwert 0450 lässt sich aber noch per Kurvenfit eine Halbwertszeit von 53,7 s berechnen - ein Wert, der dem Literaturwert für Radon-220 (55,6 s) trotz der sichtbar großen Messwertestreuung erfreulich nahe kommt.

Die Annahme eines biexponentiellen Anteils in der Abnahme der Signalspannung kann verworfen werden angesichts von Kürze und Kleinheit der kurzen der beiden Ergebniszeiten, sowie der mutmaßlich für diesen ausgewiesenen Term ursächlichen, ganz erheblichen überlagerten, kurzzeitigen Signalschwankungen.

Zu beachten ist für den angefitteten Wert der Halbwertszeit des Radon-220 (von 53,7 s) allerdings noch, dass die Herstellerfirma die Zeitbasis des aufnehmenden Messgerätes UT71D zwar mit 1 Messwert/s für die höchste Messfrequenz angibt, jedoch keine Angabe zur Genauigkeit dieses Zeitintervalls gibt. Zwei eigene kurze, explorative Überprüfungen ergaben die Aufnahme von

- 584 Messungen innerhalb von 600 s bei der Messung von (konstant) $U = 0 \text{ V}$
- 582 Messungen innerhalb von 600 s bei der Messung von (konstant) $U \approx 2,8 \text{ V}$.

Die Abweichung der Messfrequenz des verwendeten Vielfachmessgerätes lag also im Mittel bei -2,83 %, was darauf schließen lässt, dass der chinesischen Herstellerfirma ein Uhrenquarz für ca. 0,10 € /Stück zur Konstanthaltung der Messrate zu teuer war. Eine Sicherheit bzgl. der Konstanz der Abweichung der Messfrequenz bei der vorseitigen Messung lässt sich deshalb nicht ableiten.

Falls die Messrate von (im Mittel) 583 Messungen je 600 s des verwendeten Gerätes bei der vorseitigen Messreihe als gegeben angenommen werden darf, so folgt daraus eine tatsächliche Messzeit des Multimeters von ca. $600 \text{ s} / 583 \text{ Messungen} \approx 1,0292 \text{ s} / \text{Messung}$. Die Aktivität des Radon-220 ist also nicht schon innerhalb von genau 53,7 s auf 50 % ihres ursprünglichen Wertes abgefallen, sondern tatsächlich erst innerhalb von $53,7 \text{ s} \cdot 1,0292 \approx 55,3 \text{ s}$ - was dem Tabellenwert für die Halbwertszeit des Radon-220 von 55,6 s geradezu verdächtig nahe kommt (!).

Auffällig ist zunächst noch, dass die Messkammer nach dem Abklingen des Rn-220 noch eine konstante (oder sehr deutlich langsamer abklingende), vom Messkammer-Nullwert klar unterscheidbare Ausgangsspannung abgibt (vgl. rechter blauer Hinweiskasten in der obigen Zeitreihengrafik). Erst nach Abnahme des Plastikdeckels nähert sich diese Ausgangsspannung von ca. 84 mV einem neuen Nullwert von ca. 28,2 mV an, und zwar mit einem Abnahmeverhalten, in dem man spontan die Verflüchtigung einer noch in der Kammer verbliebenen, konstanten (?) Aktivitätskomponente zu erahnen glaubt (während ein anderer Teil (z.B. an die Kammerwand angelagert) offenbar in der Kammer verbleibt).

Messungen in größerem zeitlichen Abstand ergeben folgende Nullwerte (ganz ohne Bestrahlung):

- Zero-Potentiometer ganz nach rechts gedreht: +5,5 mV
- Zero-Potentiometer ganz nach links gedreht: +10,0 mV

d.h. bei Potentiometer-Mittelstellung darf ein Nullwert von ca. +8 mV erwartet werden.

Natürlich mutet es jetzt, nach Abschluss des Schaltungsdesigns für den LKD#02 etwas verwegen an, die perfekte Nullstellung der gesamten Schaltung mit der im Datenblatt des ICL 7611 für den einzelnen OP-Verstärker empfohlenen Hilfsschaltung zu versuchen. Immerhin gehen in den Nullwert ohne Bestrahlung nicht eine, sondern drei Variablen ein:

- die Offsetspannung des eingangsseitigen OPs
- die Offsetspannung des ausgangsseitigen OPs
- die Offsetspannung, die durch den Leckstrom der Eingangsstufe hervorgerufen wird.

Wenn man die OP-Verstärker als ideal unterstellt, was bedeutet, dass der letztgenannte Beitrag die gemessene Ausgangsspannung bei Potentiometer-Mittelstellung produziert, kommt man auf einen Leckstrom der Eingangsstufe von

$$I = 8 \text{ mV} / 10 \text{ M}\Omega / 0,911 \approx 880 \text{ pA}$$

entsprechend einem Anodenstrom von vmtl. 0,35 pA. Dieser Strom entspricht den vollständig nachgewiesenen, von ca. 15 in die Kammer einfallenden Alpha-Teilchen je s erzeugten Ladungen.

5. Dritter Prototyp (LKD#03): Entwurf und Aufbau

Eine Bearbeitung erfolgt möglicherweise in Kürze, möglicherweise aber auch nicht. Wer weiß ... ?

6. Dritter Prototyp (LKD#03): Vermessung und Abschätzung der Eigenschaften

Eine Bearbeitung erfolgt möglicherweise in Kürze, möglicherweise aber auch nicht. Wer weiß ... ?

7. Verweise

(0) Alle Links zuletzt abgerufen 2021-07-11:

- Grundlegende Bastelseite zur Idee von Einfachst-IOKs:
<http://techlib.com/science/ion.html>
- Ferner auch:
<http://www.vk2zay.net/article/264>
- Langjähriges Selbstbauprojekt *Theremino* (Theremino = the real modular in-out - der Projektname hat also nichts zu tun mit dem elektronischen Musikinstrument *Theremin*):
<https://www.theremino.com/en/>
und dort zum Projekt der Überwachung der Raumluft auf Radon mit einer Impuls-IOK:
https://www.theremino.com/en/files/IonChamberV7/Radon_IonChamberV7_Construction_ENG.pdf
https://www.theremino.com/en/files/IonChamberV7/Radon_IonChamberV7_Electronics_ENG.pdf
https://www.theremino.com/en/files/IonChamberV7/Radon_IonChamber_ENG.pdf
https://www.theremino.com/en/files/IonChamberV7/Radon_Info_ENG.pdf

(1) Meier, Arthur (Schulbehörde Hamburg): Die Selbstbau-Ionisationskammer. Experimente mit der Selbstbau-Ionisationskammer aus einer Blechdose. Vortragspräsentation zum Einsatz für den Erhalt der Fachkunde im Strahlenschutz. 09.2021. Meier, Arthur (Schülerlabor physik.begreifen bei DESY, Hamburg): Selbstbau einer low-cost-Ionisationskammer für Experimente zur Radioaktivität. 10.2015.

(2) Kuchling, Horst: Taschenbuch der Physik. München, Wien 2001.

(3) Auszüge aus Datenbüchern (*a.*, *b.*) sowie aktuell (2021-07-11) im Internet von diversen URLs abrufbaren Datenblättern (*c.*, *d.*, *e.*, *f.*):

a.: Siemens AG, Bereich Bauelemente, Balanstraße 73, 8000 München 80: Transistoren. Datenbuch 1980/81, S. 245.

b.: Valvo, Unternehmensbereich Bauelemente der Philips GmbH, Burchardstraße 19, 2000 Hamburg 1: Transistoren für Verstärker- und Schalteranwendungen. Datenbuch 1984, S. 172.

c.: Datenblatt Motorola Inc. ®, Document 559/D, Rev. 1, © 1996.

d.: Datenblatt Fairchild Semiconductor ® Corporation, Rev. A2, © 2002.

e.: Datenblatt ON Semiconductor ®, © Semiconductor Components Industries, LLC, Rev. 4, Publication Order Number: BC560C/D, 2012.

f.: Datenblatt Fairchild Semiconductor ® Corporation, Rev. 1.7, © 2016.

(4) LTspice ® IV. © 1998-2016 Linear Technology Corporation. Author: Mike Engelhardt.
www.linear.com

(5) *Standard.bjt* Copyright © 2000-2012 Linear Technology Corporation. All rights reserved.
.model BC560B PNP(Is=1.02f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=51.26 Bf=289.6 Ise=9.846f Ne=1.845 Ikf=.1026
Nk=.5413 Xtb=1.5 Br=6.124 Isc=1.113f Nc=1.97 Ikr=.2035 Rc=1.078 Cjc=9.81p Mjc=.332 Vjc=.4865
Fc=.5 Cje=30p Mje=.3333 Vje=.5 Tr=10n Tf=612.4p Itf=1.287 Xtf=25.55 Vtf=10 Vceo=30
Icrating=100m mfg=Philips)