

Sonden 6150AD-17, 6150AD-k und 6150AD-19

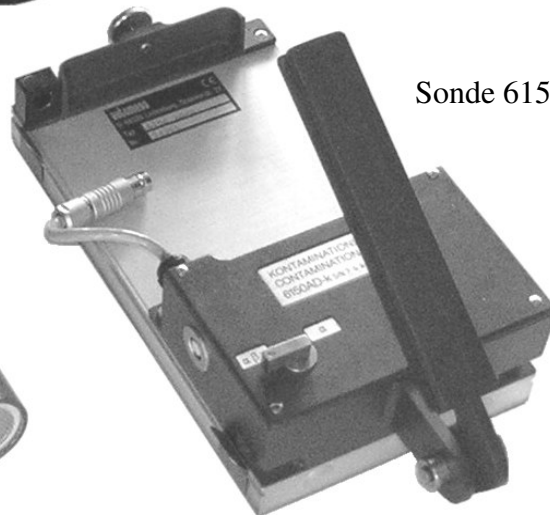
Gebrauchsanweisung
für die Kontaminationsnachweissonden
6150AD-17, 6150AD-k, 6150AD-19

Sondenkabel 1,25 m
für 6150AD-19
und 6150AD-17



Sonde 6150AD-19,
Schutzhaube abgeschraubt

Sonde 6150AD-17,
Schutzkappe abgenommen



Sonde 6150AD-k

Inhalt

1. Verwendung	1
2. Allgemeines zu Kontaminationen	1
2.1 Definition und Begriffe	1
2.2 Absorption von Strahlung in verschiedenen Materialien	3
2.2.1 Reichweite von Alpha-Teilchen	4
2.2.2 Reichweite von Beta-Teilchen	5
2.2.3 Reichweite von Photonen	7
2.3 Messung einer Oberflächenkontamination	8
2.4 Messung einer volumenbezogenen Kontamination	13
2.5 Abgrenzung zwischen Oberflächen- und Volumenkontamination	15
2.6 Wischtest	16
2.7 Kondenswasser auf dem Detektorfenster	16
3. Statistische Schwankungen und Ablesegenauigkeit	17
3.1 Die Standardabweichung »Sigma«	17
3.2 Vertrauensniveau und Fehlerwahrscheinlichkeit	18
3.3 Nulleffekt, Bruttoeffekt und Nettoeffekt	18
3.4 Erkennungs- und Nachweisgrenze	20
3.4.1 Berechnung von Sigma bei Impulzzählung	20
3.4.2 Messdauer bei einem Ratemeter	20
3.4.3 Berechnung von Sigma bei einem Ratemeter	21
3.4.4 Definition der Erkennungsgrenze	23
3.4.5 Definition der Nachweisgrenze	25
3.5 Vertrauensbereich des Nettoeffektes	26
4. Bedienung	29
4.1 Anschluss der Sonden an das 6150AD	29
4.2 6150AD-17	29
4.3 6150AD-k	31
4.4 6150AD-19	33
5. Radioaktive Kontrollmessungen	34
6. Zahlenangaben für Kalibrierfaktoren	35
6.1 6150AD-17 und 6150AD-k	35
6.2 6150AD-19	39
7. Zahlenangaben für Nachweisgrenzen	40
8. Technische Daten	43
8.1 6150AD-17 und Zubehör	43
8.2 6150AD-k und Zubehör	44
8.3 6150AD-19 und Zubehör	46

1. Verwendung

Die Sonden dienen in Verbindung mit einem Dosisleistungsmesser 6150AD dem Nachweis von flächenbezogenen (6150AD-17, 6150AD-k) oder volumenbezogenen (6150AD-19) Kontaminationen. Die Sonden 6150AD-17 und 6150AD-19 verwenden als Detektoren Geiger-Müller-Zählrohre, die Sonde 6150AD-k verwendet ein geschlossenes Proportionalzählrohr.

ACHTUNG! Die Zählrohre werden mit hohen Spannungen betrieben (ca. 500 Volt bei den Sonden 6150AD-17 und 6150AD-19, ca. 1500 Volt bei der Sonde 6150AD-k)! Versuchen Sie daher im Interesse Ihrer eigenen Sicherheit niemals, eine Sonde zu öffnen oder zu reparieren!

Das vorliegende Dokument beschreibt nur die Eigenschaften der Sonden, nicht die Bedienung und die Funktionen des Dosisleistungsmessers 6150AD, an den die Sonden angeschlossen sind. Die Kenntnis des 6150AD wird daher vorausgesetzt.

ACHTUNG! Die vorliegende Gebrauchsanweisung gilt nur als Ergänzung zu und im Zusammenhang mit der »Gebrauchsanweisung Dosisleistungsmesser 6150AD«, Ausgabe Juni 2001 oder später!

Die Sonden sind so genannte Impuls-Sonden, die vom 6150AD in der Einheit S^{-1} (Impulse pro Sekunde) dargestellt werden. Nähere Hinweise hierzu finden sich in Kapitel 6 der Gebrauchsanweisung des 6150AD, »Anzeigebereiche und Anzeigeformate«. Um die Anzeige in eine Aktivität (in Bq) oder eine flächenbezogene Aktivität (Bq/cm^2) oder eine volumenbezogene Aktivität (Bq/cm^3 , Bq/l) umzurechnen, muss die Anzeige mit einem Kalibrierfaktor multipliziert werden. Dieser Kalibrierfaktor hängt vom Radionuklid ab. Das Radionuklid muss bekannt sein, oder es muss eine Annahme über das Radionuklid gemacht werden. Eine Bestimmung des Radionuklids ist mit den Sonden nicht möglich.

2. Allgemeines zu Kontaminationen

Dieses Kapitel enthält einige grundlegende Informationen zum Thema »Kontamination« und richtet sich in erster Linie an Anwender, die mit diesem Thema nicht sehr vertraut sind. Erfahrene Anwender können dieses Kapitel überspringen.

2.1 Definition und Begriffe

Unter Kontamination versteht man allgemein eine Verunreinigung mit unerwünschten oder sogar gefährlichen Stoffen. So können z.B. Lebensmittel mit Mikroben »kontaminiert«, d.h. verunreinigt sein. Im vorliegenden Fall wird unter Kontamination immer eine Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen verstanden. Die Gefahr einer Kontamination besteht überall dort, wo offene radioaktive Stoffe vorhanden sind. Offene radioaktive Stoffe bergen im Gegensatz zu umschlossenen die Gefahr, auf die menschliche Haut oder in den menschlichen Körper gelangen. Am oder im Körper geht von radioaktiven Stoffen jedoch eine zum Teil deutlich höhere Gefahr aus, als wenn die Strahlung von außen aus einem gewissen Abstand auf den Körper einwirkt. Ein markantes Beispiel hierfür ist ein Alphastrahler. Alpha-Teilchen haben in Luft nur eine Reichweite von wenigen Zentimetern, weil sie sogar von einem leichten Medium wie Luft sehr effektiv abgebremst werden. Alphastrahlen stellen daher keine Gefahr durch äußere Bestrahlung dar, solange man sich in einem gewissen Abstand zu ihrer Quelle befindet. Wenn die Alphaquelle (die Kontamination) sich jedoch auf der Haut oder im Körper befindet, werden die Alpha-Teilchen nicht mehr von der Luft abgebremst, sondern von den Körperzellen, und können diese schädigen.

Eine Kontamination breitet sich ähnlich aus wie gewöhnlicher Schmutz oder Staub. Wenn beispielsweise ein Gegenstand kontaminiert ist, so wird bei seiner Berührung ein Teil der Kontamination auf die Haut

der Hände übertragen. Von dort kann wiederum ein Teil der Kontamination in den Körper gelangen (das Waschen der Hände vor dem Essen ist also nicht nur aus hygienischen Gründen zu empfehlen, sondern mindert auch das Risiko einer inneren Kontamination). Die Aufnahme von Kontamination in den Verdauungstrakt, also beim Essen oder Trinken, wird als Ingestion bezeichnet. Die Aufnahme von Kontamination in die Lunge, also beim Einatmen, wird als Inhalation bezeichnet. Weiterhin gibt es noch die Möglichkeit, dass eine Kontamination über eine Verletzung der Haut direkt in die Blutbahn gelangt. Radioaktive Stoffe, die auf welchem Wege auch immer in den Körper gelangt sind, werden auch als Inkorporation bezeichnet.

Die Menge eines radioaktiven Stoffes wird als Aktivität bezeichnet und in Bq (Becquerel) gemessen. Ein Bq ist diejenige Menge eines radioaktiven Stoffes, in der ein Atomkern pro Sekunde zerfällt^A. Welcher körperlichen Menge (gemessen z.B. in Gramm) ein Becquerel entspricht, hängt von der Halbwertszeit des radioaktiven Stoffes ab^B.

Je nach dem, um welchen radioaktiven Stoff (welches Radionuklid) es sich handelt, werden bei Zerfall der Atomkerne Alpha-, Beta- oder Gammastrahlen ausgesandt, in den meisten Fällen sogar Kombinationen aus diesen Strahlungsarten.

Wenn die Oberfläche eines Gegenstandes radioaktiv verunreinigt ist, spricht man von einer Oberflächenkontamination, die in Bq/cm² gemessen wird (Becquerel pro Quadratcentimeter, d.h. die Menge des radioaktiven Stoffes pro Flächeneinheit). Die Sonden 6150AD-17 und 6150AD-k dienen dem Nachweis einer Oberflächenkontamination. Hierzu müssen sie in der Lage sein, alle Strahlungsarten zu erfassen. Geräte, die wie das 6150AD selbst nur zur Messung einer Gamma-Dosisleistung ausgelegt sind, sind zum Aufspüren von Oberflächenkontaminationen kaum geeignet, sogar wenn die Kontamination auch Gammastrahlen aussendet. Dies liegt daran, dass Gammastrahlen schwieriger nachzuweisen sind, weil sie wegen ihres höheren Durchdringungsvermögens das Zählrohr durchqueren können, ohne ein Signal auszulösen. Alpha- und Beta-Teilchen hingegen lösen immer einen Impuls aus, wenn sie in das Zählrohr gelangen. Damit sie in das Zählrohr gelangen können, muss dieses allerdings ein sehr dünnwandiges Fenster besitzen. Die Reichweite von Alpha- und Beta-Teilchen spielt sowohl bei der Konstruktion von Messgeräten als auch bei deren Benutzung eine entscheidende Rolle. Wir werden die Frage der Reichweite deshalb später genauer diskutieren.

Eine Kontamination kann aber nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Innern eines Stoffes oder Gegenstandes vorhanden sein. Pflanzen können während ihres Wachstums radioaktive Stoffe aus Boden, Luft und Wasser aufnehmen und in sich ansammeln. Wenn bei der Stahlherstellung versehentlich radioaktiver Schrott mit eingeschmolzen wird, wird der daraus entstandene Stahl durchdringend kontaminiert sein. Bei solchen Stoffen spricht man von einer »spezifischen Aktivität« gemessen in Bq/g (Bq pro Gramm). Bei Flüssigkeiten wird der Aktivitätsgehalt oft auch volumenbezogen angegeben, also in Bq/cm³ (Bq pro Kubikcentimeter) oder Bq/l (Bq pro Liter). In Analogie zur Oberflächenkontamination

^A Früher wurde die Einheit Ci (Curie) für die Aktivität verwendet. Ein Curie ist definiert als die Aktivität eines Gramms Radium (Ra-226, Halbwertszeit 1620 Jahre). Es gelten die Umrechnungen

1 Ci (Curie)	= 37 GBq (Giga-Becquerel)	= 37 · 10 ⁹ Becquerel
1 mCi (Milli-Curie)	= 37 MBq (Mega-Becquerel)	= 37 · 10 ⁶ Becquerel
1 µCi (Mikro-Curie)	= 37 kBq (Kilo-Becquerel)	= 37 · 10 ³ Becquerel

^B Wenn $T_{1/2}$ die Halbwertszeit ist, dann lässt sich die Anzahl N der Atome, die einer Aktivität von einem Bq entspricht, nach folgender Formel berechnen:

$$N = T_{1/2} / \ln 2 = 1,44 \cdot T_{1/2}$$

wobei $T_{1/2}$ in Sekunden einzusetzen ist. Beispiel: für Cs-137 ist $T_{1/2} = 30$ Jahre = $9,5 \cdot 10^8$ Sekunden, woraus sich $N = 1,4 \cdot 10^9$ ergibt. Mit anderen Worten, 1,4 Milliarden Cs-137 Atome entsprechen einer Aktivität von 1 Bq; von diesen 1,4 Milliarden Atomkernen zerfällt pro Sekunde einer. 1,4 Milliarden Cs-137 Atome haben eine Masse von $3,1 \cdot 10^{-13}$ Gramm, sind also als »körperliche« Menge ausgesprochen winzig. Ein einziges Gramm reines Cs-137 hat demnach eine Aktivität von $3,2 \cdot 10^{12}$ Bq, das sind 3,2 TBq (Tera-Becquerel).

könnte man hier von einer Volumenkontamination sprechen. Zwar ist »Volumenkontamination« kein eingeführter Begriff, wir werden ihn aber dennoch verwenden. Die Sonde 6150AD-19 dient dem Nachweis der Volumenkontamination einer Flüssigkeit. Dieser Nachweis ist schwieriger als derjenige einer Oberflächenkontamination, weil ein großer Teil der Strahlung bereits in der Flüssigkeit absorbiert wird und gar nicht bis zum Detektor gelangen kann. Wegen der Selbstabsorption in der dicken Flüssigkeitsschicht macht es keinen Sinn, den angrenzenden Detektor mit einer sehr dünnen und damit mechanisch empfindlichen Wand auszustatten.

2.2 Absorption von Strahlung in verschiedenen Materialien

Im Zusammenhang mit der Messung von Kontaminationen taucht oft die Frage auf, ob die von einem radioaktiven Stoff ausgesandten Teilchen eine gewisse Schicht eines gewissen Materials durchdringen können. Wir werden in diesem Abschnitt einige Informationen zu diesem Thema zusammenstellen.

Man gibt in diesem Zusammenhang die Dicke einer Schicht nicht mit einer Längeneinheit wie cm an, sondern als so genanntes »Flächengewicht^A« in mg/cm^2 (Milligramm pro Quadratzentimeter). Der Grund hierfür ist, dass unterschiedliche Materialien bei gleichem Flächengewicht ähnliche Absorption haben, weil die Absorption eines Teilchens in erster Linie davon abhängt, wie viel Masse (eines beliebigen Materials) das Teilchen durchqueren muss. Je schwerer ein Material ist, um so geringer ist die Dicke einer Schicht mit einem bestimmten Flächengewicht. Flächengewicht und Dicke einer Materialschicht sind über die Dichte des Materials wie folgt verknüpft:

$$\text{Flächengewicht} = \text{Dichte} \cdot \text{Dicke}$$

Es gibt übrigens auch aus dem Alltag ein Beispiel, in dem die Dicke einer Schicht als Flächengewicht angegeben wird, nämlich bei Papier. Übliches Schreib- oder Druckerpapier hat eine Dicke von $80 \text{ g}/\text{m}^2$, das sind $8 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

Die nachfolgende Tabelle zeigt einige Beispiele, wie dünn die Schicht eines Materials sein muss, damit sie ein Flächengewicht von $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ hat:

	Dichte	Dicke einer Schicht mit einem Flächengewicht von $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ (= $1 \text{ mg}/\text{cm}^2 / \text{Dichte}$)
Luft	ca. $0,0012 \text{ g}/\text{cm}^3$ bei 20°C	ca. $0,83 \text{ cm} = 8300 \text{ }\mu\text{m}$
Wasser	$1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$	$0,001 \text{ cm} = 10 \text{ }\mu\text{m}$
Aluminium	$2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$	$0,00037 \text{ cm} = 3,7 \text{ }\mu\text{m}$
Glimmer	ca. $2,8 \text{ g}/\text{cm}^3$	ca. $0,00036 \text{ cm} = 3,6 \text{ }\mu\text{m}$

Aluminium und Glimmer sind Werkstoffe, die häufig zur Herstellung dünner Fenster von Zählrohren verwendet werden. Glimmer bezeichnet eine Gruppe von Mineralien (z.B. Muskovit), die sich leicht in dünne Schichten spalten lassen. Da das Flächengewicht dünner Fenster aus diesen Materialien typisch im Bereich $1,5 - 3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ liegt, beträgt die Dicke solcher Fenster nur $5 - 10 \text{ }\mu\text{m}$ ($1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = \text{ein Tausendstel mm}$). Deswegen sind solche Fenster auch sehr empfindlich gegen mechanische Zerstörung und müssen durch Schutzgitter oder sonstige Maßnahmen gegen Berührung geschützt werden.

Unter »Reichweite« eines Teilchens versteht man die Wegstrecke, die das Teilchen zurücklegt, bis es ganz abgebremst ist. Ein Teilchen mit einer bestimmten Anfangsenergie kann eine bestimmte Masseschicht durchqueren, d.h. eine Schicht mit einem bestimmten Flächengewicht. Deshalb gibt man wie bei der Dicke von Materialschichten auch die Reichweite von Teilchen meistens in mg/cm^2 an. Je

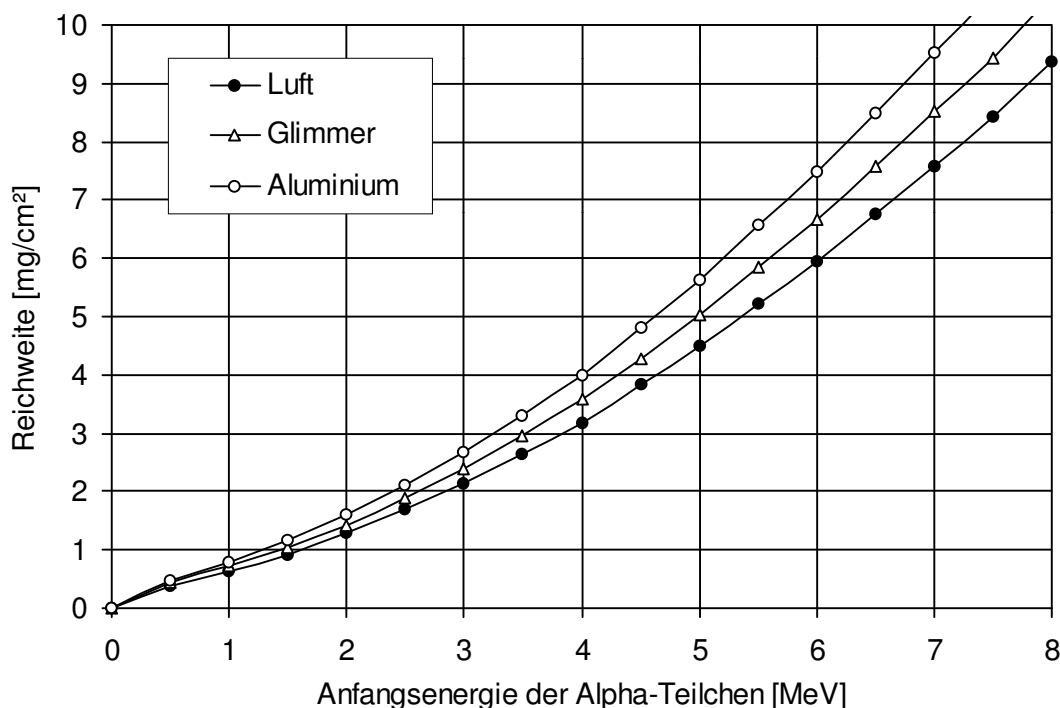
^A Die Bezeichnung »Flächengewicht« ist sachlich nicht ganz korrekt, weil es sich nicht um das Gewicht, sondern um die Masse einer Schicht mit einer bestimmten Fläche handelt. Dennoch hat sich diese Bezeichnung so eingebürgert, weil im Alltag nicht zwischen Masse und Gewicht unterschieden wird.

größer die Anfangsenergie eines Teilchens ist, um so größer ist auch seine Reichweite. Damit ein Teilchen in einem Detektor nachgewiesen werden kann, muss es in den Detektor eindringen können; seine Reichweite muss also größer sein als die Dicke des Detektorfensters.

2.2.1 Reichweite von Alpha-Teilchen

Alpha-Teilchen sind relativ schwer und bewegen sich relativ langsam durch ein Material. Sie hinterlassen eine dichte Ionisationsspur längs ihres Weges und werden schnell abgebremst. Sie haben daher nur eine sehr geringe Reichweite. Alpha-Teilchen, die von einem bestimmten Radionuklid ausgesandt werden, haben alle dieselbe für das Nuklid charakteristische Anfangsenergie (z.B. ca. 5,5 MeV bei Am-241). Das nachfolgende Diagramm zeigt die Reichweite von Alpha-Teilchen in verschiedenen Materialien als Funktion der Anfangsenergie der Alpha-Teilchen.

Reichweite von Alpha-Teilchen in Luft, Glimmer und Aluminium

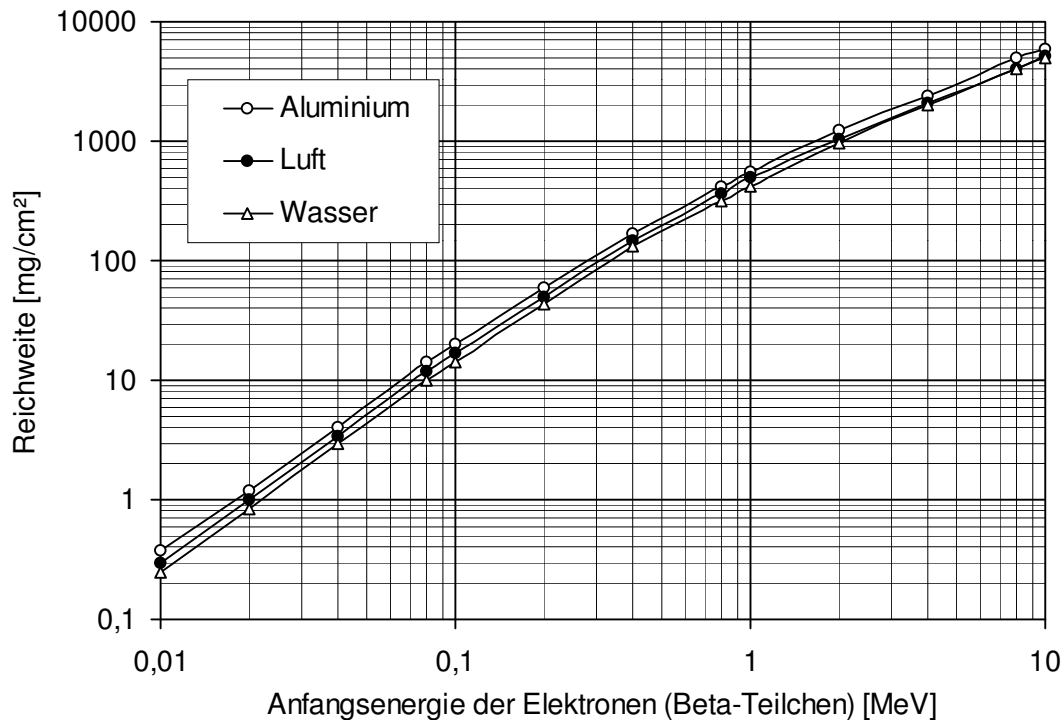


Die Reichweite gemessen in mg/cm^2 ist in unterschiedlichen Materialien also ziemlich ähnlich. Man beachte, dass ein Alpha-Teilchen sowohl die Luftschicht zwischen Quelle und Messgerät als auch das Fenster des Messgerätes durchdringen muss, um erkannt zu werden. Die meisten Alpha-Strahler senden Alpha-Teilchen mit einer Energie von 4 - 6 MeV aus. Daher sollte ein Messgerät möglichst in der Lage sein, Alpha-Teilchen ab einer Anfangsenergie von 4 MeV nachzuweisen. Wie das Diagramm bei 4 MeV zeigt, darf hierzu die Summe aus Luftschicht und Fensterdicke nicht mehr als ca. $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ betragen. Wenn das Fenster bereits $2 \text{ mg}/\text{cm}^2$ dick ist, darf die Luftschicht dann nicht mehr als ca. $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ (= 0,8 cm Luft) betragen. In der Praxis werden die Verhältnisse noch etwas ungünstiger sein, weil viele Alpha-Teilchen bereits in der Quelle einen Teil ihrer Energie verloren haben. Dies zeigt, wie wichtig es ist, den Abstand zwischen Quelle und Messgerät möglichst gering zu halten. Hier kann jeder Millimeter eine Rolle spielen.

2.2.2 Reichweite von Beta-Teilchen

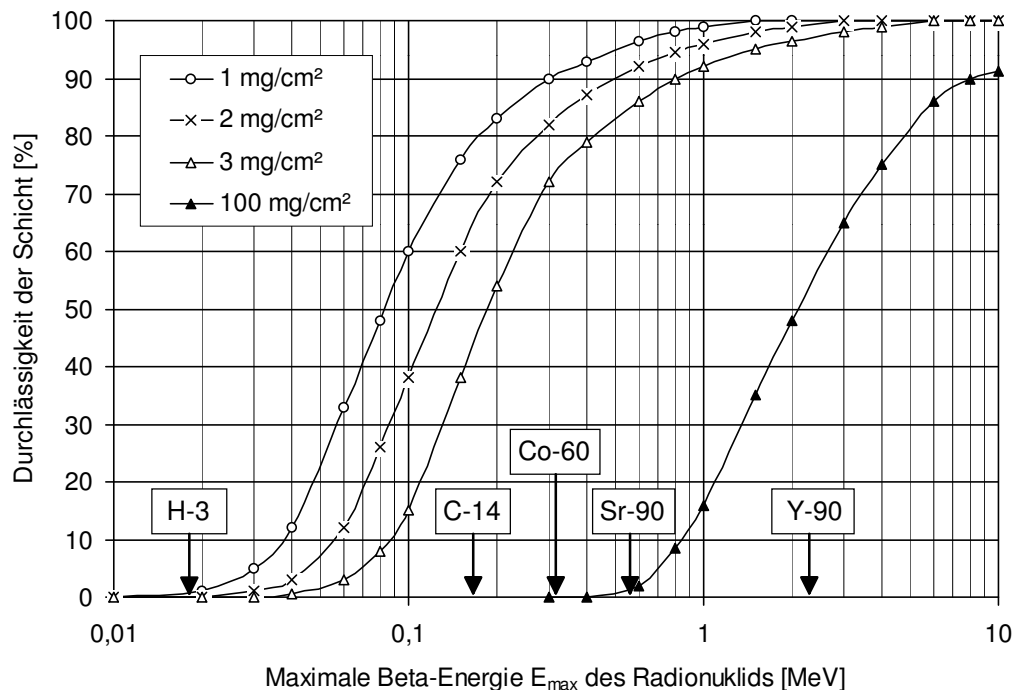
Beta-Teilchen sind schnelle Elektronen. Elektronen haben eine deutlich größere Reichweite als Alpha-Teilchen. Allerdings ist die Reichweite von Elektronen weniger scharf definiert als diejenige von Alpha-Teilchen, weil Elektronen bei Stößen mit den Atomen des Absorbers häufig ihre Richtung ändern. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Reichweite von Elektronen in verschiedenen Materialien als Funktion der Anfangsenergie der Elektronen.

Reichweite von Elektronen in Luft, Wasser und Aluminium



Wie bei Alpha-Teilchen ist die Reichweite gemessen in mg/cm^2 in unterschiedlichen Materialien ziemlich ähnlich. Das Diagramm lässt sich aber leider nicht dazu benutzen, die Reichweite der Beta-Teilchen eines bestimmten Radionuklids direkt abzulesen, weil Beta-Teilchen keine einheitliche Energie haben, sondern ein ganzes Spektrum bis hin zur für das Nuklid charakteristischen Maximalenergie E_{max} ausfüllen. Die mittlere Energie der Beta-Teilchen liegt ungefähr bei $E_{\text{max}}/3$. Da Beta-Teilchen unterschiedlicher Energie auch unterschiedliche Reichweiten haben, gibt es gar keine einheitliche Reichweite für die Betastrahlung eines Nuklids. Es ist daher sinnvoller, die Durchlässigkeit (Transmission) einer bestimmten Schicht für Betastrahlung einer bestimmten Maximalenergie zu betrachten. Die Durchlässigkeit gibt an, wie viele Prozent der Beta-Teilchen die Schicht durchdringen. Die Durchlässigkeit des Fensters eines Messgerätes darf nicht zu klein sein, damit die Betastrahlung noch im Detektor nachgewiesen werden können. Das Diagramm auf der nächsten Seite zeigt diese Durchlässigkeit für verschiedene Schichtdicken in Abhängigkeit von der Maximalenergie E_{max} .

Prozentuale Durchlässigkeit von Materialschichten verschiedener Dicke für Betastrahlung in Abhängigkeit von der maximalen Beta-Energie



Die Daten in diesem Diagramm sind nur relativ grobe Werte. Sie können daher für alle in diesem Zusammenhang interessierenden Materialien benutzt werden. Die verschiedenen Schichtdicken wurden aus folgendem Grund gewählt:

Die ersten drei Kurven zeigen die Eigenschaften von Glimmerfenstern, die häufig in Zählrohren verwendet werden, und deren Dicke meistens im Bereich 1 bis 3 mg/cm² liegt.

Die vierte Kurve für 100 mg/cm² steht für die Metallwand eines fensterlosen Zählrohres, das außer für Gammastrahlung auch für Betastrahlung hoher Energie geeignet ist. Solche Zählrohre sind mit einer besonders dünnen Metallwand ausgestattet, deren Dicke meistens im Bereich 40 bis 100 mg/cm² liegt. Derartige Zählrohre sind robuster und kostengünstiger herzustellen als Zählrohre mit Fenster. Sie eignen sich für den Nachweis von Betastrahlung ab einer Maximalenergie von ca. 1 MeV.

Reine Gamma-Zählrohre haben Wandstärken von 500 mg/cm² und mehr, sind also zum direkten Nachweis von Betastrahlung nicht geeignet. Durch die beim Abbremsen von Betastrahlung entstehende Bremsstrahlung lässt sich jedoch auch mit solchen Zählrohren Betastrahlung hoher Energie indirekt in geringem Umfang nachweisen.

Die maximale Beta-Energie der meisten Radionuklide liegt im Bereich von 0,15 MeV bis 2,5 MeV. Diese Nuklide lassen sich mit Zählrohren recht gut nachweisen, wenn deren Fensterdicke ca. 3 mg/cm² nicht überschreitet (für Betastrahlung mit einer maximalen Energie von 0,15 MeV hat ein Glimmerfenster der Dicke 3 mg/cm² noch eine Durchlässigkeit von ca. 40%, siehe obiges Diagramm). Radionuklide, deren maximale Beta-Energie deutlich unter 0,15 MeV liegt, erfordern andere Messverfahren. Zu diesen Radionukliden zählt insbesondere Tritium (H-3) mit seiner maximalen Beta-Energie von nur 0,0186 MeV. Diese Sonderrolle von Tritium hat sich auch in der Normgebung niedergeschlagen. Es gibt Normen für Radionuklide mit einer maximalen Beta-Energie unter 0,15 MeV, die hauptsächlich für Tritium gedacht sind. Wir werden im Folgenden jedoch nur Betastrahlung mit einer maximalen Beta-Energie oberhalb 0,15 MeV betrachten, so wie dies auch die noch zu diskutierende Norm DIN ISO 7503-1 tut.

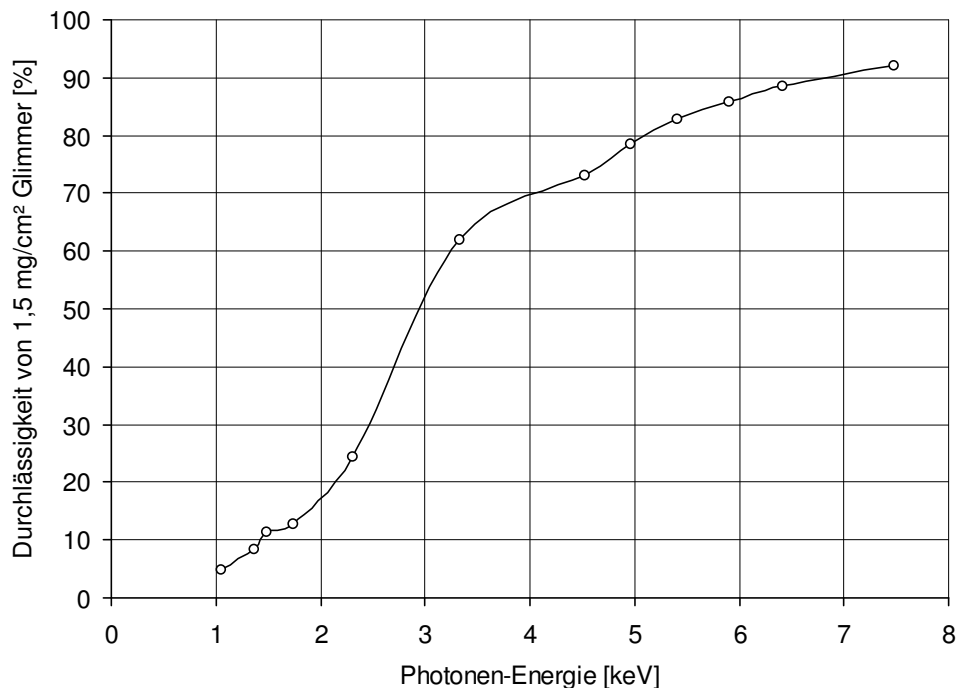
2.2.3 Reichweite von Photonen

Elektromagnetische Strahlung ist eines der vielfältigsten Phänomene überhaupt. Zu den aus dem Alltag bekanntesten Vertretern elektromagnetischer Strahlung zählen Funkwellen und das sichtbare Licht. Auch Röntgen- und Gammastrahlen sind »Licht«, jedoch mit viel kürzeren Wellenlängen. Die unterschiedliche Bezeichnung bezieht sich nicht auf die Natur der Strahlung, die dieselbe ist, sondern auf ihre Herkunft (Röntgenstrahlung entsteht, wenn schnelle Elektronen abgebremst werden, wie dies z.B. mit dem Elektronenstrahl einer Röntgenröhre geschieht, während Gammastrahlung beim Zerfall instabiler Atomkerne ausgesandt wird). Man hat deswegen den Oberbegriff »Photonenstrahlung« eingeführt. Auch die beim Abbremsen von Beta-Teilchen entstehende Bremsstrahlung ist Photonenstrahlung.

Herkömmlicherweise charakterisiert man Photonenstrahlung nicht durch ihre Frequenz (wie bei Funkwellen) oder ihre Wellenlänge (wie beim Licht), sondern durch ihre Energie^A. Photonen haben eine wesentlich höhere Reichweite als Beta-Teilchen gleicher Energie. So benötigt man z.B. 21 mm Blei (23700 mg/cm²), um die Photonenstrahlung von Cs-137 (0,662 MeV) auf ein Zehntel ihrer Anfangsintensität abzuschwächen. Röntgenstrahlung und die Gammastrahlung der meisten Radionuklide können daher leicht in einen dünnwandigen Detektor eindringen. Sie werden in vielen Fällen sogar den Detektor durchqueren, ohne ein Signal auszulösen, was wiederum ihren Nachweis erschwert.

Die Absorption durch dünne Fenster spielt erst bei sehr kleinen Photonen-Energien eine Rolle. Das nachfolgende Diagramm zeigt als Beispiel, dass bei einem Glimmerfenster der Stärke 1,5 mg/cm² erst bei Photonen-Energien unterhalb ca. 8 keV die Durchlässigkeit merklich unter 100% sinkt:

Prozentuale Durchlässigkeit einer Glimmerschicht von 1,5 mg/cm² für Photonenstrahlung in Abhängigkeit von der Photonen-Energie



^A Die Wellenlänge λ und die Frequenz ν einer beliebigen elektromagnetischen Strahlung sind über die Lichtgeschwindigkeit c wie folgt miteinander verknüpft:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Die Energie eines elektromagnetischen Strahlungsfeldes ist nicht völlig gleichmäßig verteilt, sondern setzt sich aus kleinen »Paketen« zusammen, den so genannten Photonen (»Licht-Teilchen«). Die Energie E eines Photons berechnet sich aus der Frequenz ν mit Hilfe der Planckschen Konstante h wie folgt:

$$E = h \cdot \nu.$$

Solch geringe Energien treten in der Praxis nur bei sehr weicher Röntgenstrahlung sowie bei einigen wenigen Radionukliden auf. Das bekannteste Beispiel für ein solches Radionuklid ist Fe-55 (Eisen 55), das Photonenstrahlung der Energie 5,9 keV aussendet.

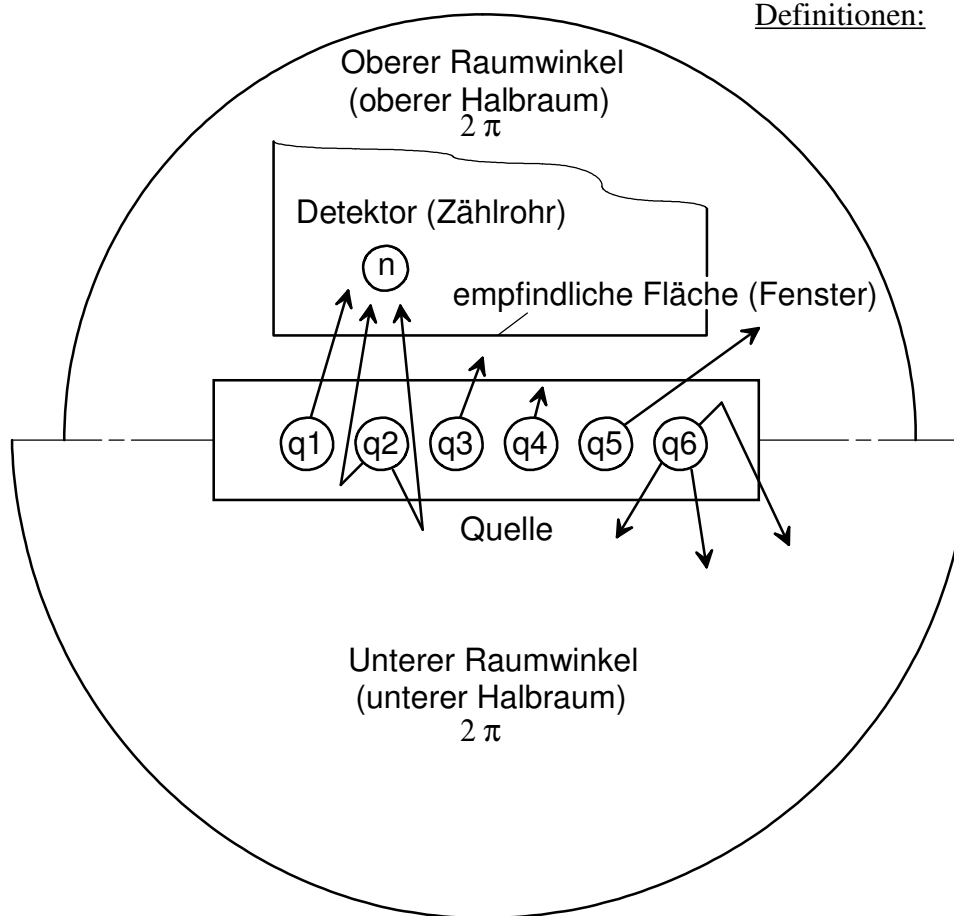
2.3 Messung einer Oberflächenkontamination

In einem radioaktiven Stoff mit einer Aktivität von beispielsweise 100 Bq zerfallen pro Sekunde 100 Atomkerne. Wenn jeder dieser Atomkerne ein Teilchen aussendet, und jedes dieser Teilchen einen Impuls im Messgerät auslöst, muss das Gerät also 100 Impulse pro Sekunde anzeigen. Leider ist dies in der Praxis nicht der Fall. Das Gerät wird deutlich weniger anzeigen, und zwar aus zwei leicht ersichtlichen Gründen:

1. Die Teilchen fliegen in alle beliebigen Richtungen des Raumes. Bei einer kontaminierten Oberfläche wie einer Tischplatte wird die Hälfte der Teilchen in den freien Raum nach oben fliegen, die andere Hälfte wird in die Tischplatte hinein fliegen. Damit kann maximal die Hälfte der Teilchen in den Detektor des Gerätes gelangen, selbst wenn das Gerät dicht über die Tischplatte gehalten wird.
2. Von den Teilchen, die in Richtung des Detektors fliegen, wird nur ein gewisser Teil erkannt. Der andere Teil gelangt nicht in den empfindlichen Teil des Detektors, weil er zuvor absorbiert wird, und zwar entweder bereits in der Quelle selbst oder von der mechanischen Konstruktion des Messgerätes (Fenster, Schutzgitter). Wie groß der nicht erkannte Teil ist, hängt von Art und Energie der Teilchen und auch von den Eigenschaften der Quelle ab.

Dies ist allerdings noch etwas vereinfacht. Es gibt noch weitere Effekte, die die Anzeige des Messgerätes beeinflussen. Wir werden diese Effekte jetzt eingehender diskutieren.

In Anlehnung an DIN ISO 7503-1 teilen wir die von der Quelle ausgesandten Teilchen entsprechend ihrem Schicksal in sechs Gruppen ein (siehe Abbildung). Die Quelle kann hierbei eine echte Oberflächenkontamination sein, aber auch ein Prüfstrahler zur Überprüfung oder Kalibrierung des Messgerätes.



Definitionen:

Aktivität der Quelle:

$$A = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

W = empfindliche Fläche des Detektors in cm^2

Flächenbezogene Aktivität:

$$A_s = A/W \text{ in Bq/cm}^2$$

Oberflächenemissionsrate:

$$q_{2\pi} = q_1 + q_2 + q_3 + q_5$$

Wirkungsgrad der Quelle bzw. der Oberfläche:

$$\epsilon_s = q_{2\pi} / A$$

n = die im Messgerät erzeugte Impulsrate

Ansprechvermögen des Messgerätes nach DIN ISO 7503-1:

$$\epsilon_i = n / q_{2\pi}$$

Ansprechvermögen des Messgerätes nach DIN 44801-1 / IEC 325:

$$\epsilon_{4\pi} = n / A$$

Die gesamte Aktivität A der Quelle ist die Summe der Anteile q1 bis q6. Nur die Anteile q1 und q2 gelangen zum Detektor. Dies bedeutet aber nicht, dass die Anteile q1 und q2 vollständig vom Gerät erkannt werden. Als Detektor gilt das Zählrohr inklusive seiner mechanischen Wand (Fenster, Schutzgitter). Da insbesondere das Schutzgitter einen Teil der Teilchen absorbiert, ist die Anzeige n kleiner als die Summe aus q1 und q2.

WICHTIG: Bei dieser Betrachtung ist A immer nur diejenige Aktivität, die unter der empfindlichen Fläche des Detektors liegt, auch wenn die Quelle größer sein sollte als diese Fläche. Ein Messgerät kann immer nur diejenige Alpha- oder Beta-Aktivität erkennen, die unter seiner empfindlichen Fläche liegt. Es wird eine Aktivität als die gesamte Aktivität unterhalb dieser Fläche angezeigt, und es wird eine Oberflächenkontamination als einen Wert gemittelt über diese Fläche angezeigt, falls die Aktivität nicht gleichmäßig verteilt ist.

Die Anteile q1 bis q6 haben folgende Bedeutung:

q1: Teilchen, die den Detektor unmittelbar erreichen.

q2: Teilchen, die den Detektor infolge Rückstreuung aus der Quelle oder deren Untergrund erreichen. Dieser Effekt ist besonders bei energiereichen Beta-Strahlern anzutreffen und kann dazu führen, dass mehr als die Hälfte der Teilchen die Quelle nach oben verlässt. Dennoch ist dieser Fall in der Praxis relativ selten, weil die Selbstabsorption (q4) oft stärker ist als die Rückstreuung.

- q3: Teilchen, die die Quelle nach oben verlassen, aber den Detektor wegen Absorption in der Luft nicht erreichen. Dieser Effekt wird um so stärker, je größer der Abstand zwischen Quelle und Messgerät ist. Er spielt besonders bei Alpha-Strahlern eine wichtige Rolle.
- q4: Teilchen, die nach oben ausgesandt werden, aber die Quelle wegen Selbstabsorption nicht verlassen. Dieser Effekt kann dazu führen, dass weniger als die Hälfte der Teilchen die Quelle nach oben verlässt. Dieser Effekt wird um so bedeutender, je geringer die Reichweite der Teilchen und je dicker die Quelle ist. Bei Alpha-Strahlern kann er so bedeutend sein, dass fast die gesamte Strahlung in der Quelle selbst absorbiert wird, und so die Aktivität (die Kontamination) deutlich unterschätzt wird.
- q5: Teilchen, die die Quelle nach oben verlassen, aber den Detektor aus geometrischen Gründen verfehlen (Randverluste).
- q6: Teilchen, die die Quelle nach unten verlassen oder nach unten gestreut werden.

So vielfältig wie diese Effekte sind, so schwierig kann sich auch die Bestimmung einer Oberflächenkontamination in der Praxis gestalten. Die einzelnen Effekte zeigen auch, was in der Praxis alles beachtet werden muss. So muss man das Messgerät möglichst dicht an die zu messende Oberfläche bringen, um Absorption in der Luft und geometrische Verluste möglichst klein zu halten (aber auch nicht so dicht, dass Kontamination auf das Messgerät übertragen werden könnte). Außerdem hängt die Anzeige eines Messgerätes auch von den Eigenschaften der Quelle selbst ab. Hier ist besonders die Selbstabsorption zu erwähnen. Quellen mit gleicher Aktivität, aber unterschiedlicher Selbstabsorption, haben unterschiedliche Oberflächenemissionsraten. So kann Feuchtigkeit eine Alpha-Kontamination stark überdecken; lässt man die Oberfläche trocknen, und wiederholt die Messung unter sonst gleichen Bedingungen, ergibt sich eine wesentlich höhere Anzeige. Auch Prüfquellen gleicher Aktivität können unterschiedliche Oberflächenemissionsraten haben, wenn es dem einen Hersteller besser gelungen ist als dem anderen, die Quelle möglichst dünn, d.h. frei von Selbstabsorption, herzustellen.

Wir wollen nun das Ansprechvermögen eines Messgerätes genauer betrachten. Das Ansprechvermögen ist deshalb wichtig, weil es benötigt wird, die Anzeige des Gerätes in eine Kontamination umzurechnen. Das Ansprechvermögen hängt stark von Art und Energie der Strahlung, d.h. vom verursachenden Radionuklid ab. Gewöhnlich geben Gerätehersteller das Ansprechvermögen für bestimmte Nuklide an. Darüber hinaus kann es erforderlich werden, dass ein Anwender das Ansprechvermögen bezüglich eines speziellen Nuklids selbst mit Hilfe einer Referenzquelle bestimmt.

Das Ansprechvermögen eines Messgerätes ist seine Anzeige geteilt durch den wahren Wert der Messgröße. Im Falle eines Kontaminationsmessgerätes ist die Anzeige (zum Beispiel) Impulse pro Sekunde, und der wahre Wert ist eine Aktivität in Bq, also in Zerfällen pro Sekunde. Deshalb bezeichnet man das Ansprechvermögen eines Kontaminationsmessgerätes auch als Wirkungsgrad (»efficiency«, Symbol ϵ), weil es angibt, wie wirkungsvoll Zerfälle pro Sekunde in eine Anzeige von Impulsen pro Sekunde umgewandelt werden. Für den vorliegenden Zweck können die Begriffe »Ansprechvermögen« und »Wirkungsgrad« als gleichwertig betrachtet werden. Beide Begriffe werden auch in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet, auch was die Übersetzung der englischen Begriffe »response« und »efficiency« betrifft.

Wie die unterschiedlichen Definitionen in DIN ISO 7503-1 und DIN 44801-1 zeigen (DIN 44801-1 enthält sinngemäß die internationale Norm IEC 325), herrscht auch unter Fachleuten keine Einigkeit, wie das Ansprechvermögen zu definieren ist. Wir werden daher beide Normen betrachten.

	DIN ISO 7503-1		DIN 44801-1 / IEC 325	
	Definition	Einheit	Definition	Einheit
Wirkungsgrad der Quelle bzw. der Oberfläche	$\epsilon_s = q_{2\pi} / A$	-	Begriff nicht definiert	
(2 π -)Wirkungsgrad des Gerätes	$\epsilon_i = n / q_{2\pi}$	-	Begriff nicht definiert	
	In der deutschen Fassung leider als »Ansprechvermögen« bezeichnet!			
(4 π -)Wirkungsgrad des Gerätes	$R_i = \epsilon_i \cdot \epsilon_s = n / A$	-	$\epsilon_{4\pi} = n / A$	s ⁻¹ / Bq
	In der deutschen Fassung als »Aktivitätsbezogene Impulsrate« bezeichnet		In der deutschen Fassung als »Ansprechvermögen« bezeichnet	
Wenn die Wirkungsgrade ϵ und die empfindliche Fläche W des Messgerätes bekannt sind, lassen sich A und A_s aus einem Messwert n wie folgt berechnen:				
Aktivität A (unter der empfindlichen Fläche W)	$A = n / (\epsilon_i \cdot \epsilon_s)$	Bq	$A = n / \epsilon_{4\pi}$	Bq
Flächenbezogene Aktivität A_s (gemittelt über die empfindliche Fläche W)	$A_s = A / W$ $= n / (\epsilon_i \cdot \epsilon_s \cdot W)$	Bq / cm ²	$A_s = A / W$ $= n / (\epsilon_{4\pi} \cdot W)$	Bq / cm ²

Zu den in der Tabelle verwendeten Symbolen ist Folgendes anzumerken:

1. n ist die von der Quelle hervorgerufene Anzeige des Messgerätes. Allerdings hat jedes Messgerät auch ohne Quelle eine gewisse Anzeige, den so genannten apparativen Untergrund, auch Nulleffektzählrate genannt. Dieser apparative Untergrund muss von der Anzeige abgezogen werden. Demnach ist n nicht einfach die Anzeige des Messgerätes, sondern die Anzeige mit Quelle vermindert um die Anzeige ohne Quelle.
2. Bei der empfindlichen Fläche W handelt es sich um die gesamte geometrische Fensterfläche inklusive konstruktiver Elemente wie dem Schutzgitter. Da ein Teil von W durch das Schutzgitter abgedeckt ist, ist die »wirklich« empfindliche Fläche, gelegentlich als »effektive Fensterfläche« oder »nutzbare Fensterfläche« bezeichnet, kleiner als W . Dies darf den Anwender jedoch nicht weiter kümmern, da die teilweise Abdeckung des Fensters bereits im Ansprechvermögen des Gerätes berücksichtigt ist.
3. $\epsilon_{4\pi}$ ist ein von uns gewähltes Symbol für das Ansprechvermögen. DIN 44801-1 verwendet hierfür kein Symbol.
4. Die anderen Symbole A , A_s , $q_{2\pi}$, ϵ_s und ϵ_i sind neben der Abbildung auf Seite 9 definiert.

Betrachten wir zunächst DIN 44801-1 / IEC 325. Der entscheidende Parameter zur Bestimmung der Aktivität ist das Ansprechvermögen $\epsilon_{4\pi}$. Die Bezeichnung »Wirkungsgrad« ist für diesen Parameter etwas ungünstig, weil gemäß der Definition von $\epsilon_{4\pi}$ selbst ein ideales Gerät wegen des Anteils q_6 einen Wirkungsgrad von kaum mehr als 50% erreichen kann. In der Technik ist es aber allgemein üblich, einen Wirkungsgrad so zu definieren, dass ein ideales - d.h. verlustfreies - Gerät einen Wirkungsgrad von 100% hat. Deswegen vermeidet DIN 44801-1 auch den Begriff des Wirkungsgrades und spricht von einem Ansprechvermögen, welches in der - eigentlich dimensionslosen - Einheit »s⁻¹/Bq« angegeben wird. Wir werden nicht so streng wie die DIN-Norm sein und auch in diesem Zusammenhang von einem

Wirkungsgrad sprechen, wobei wir uns darüber im Klaren sind, dass dieser Wirkungsgrad nie 100% erreichen kann. Dieser Wirkungsgrad wird auch als » 4π -Wirkungsgrad« bezeichnet, weil er sich auf alle in den gesamten Raumwinkel von 4π ausgesandten Teilchen bezieht. Der Vorteil des 4π -Wirkungsgrades ist, dass der Anwender pro Radionuklid nur einen einzigen Parameter zur Bestimmung der Aktivität benötigt. Der Nachteil ist, dass die Eigenschaften der Quelle gleich mit in diesem Wirkungsgrad enthalten sind. Wenn man nach DIN 44801-1 / IEC 325 vorgeht, setzt man also voraus, dass alle zu messenden Quellen eines bestimmten Radionuklids gleiche Eigenschaften hinsichtlich Selbstabsorption und Rückstreuung haben. Da dies in der Praxis nicht der Fall ist, sind entsprechende Ungenauigkeiten zu erwarten.

DIN ISO 7503-1 löst dieses Problem, indem es $\epsilon_{4\pi}$ in ϵ_s und ϵ_i aufspaltet ($\epsilon_{4\pi} = \epsilon_s \cdot \epsilon_i$). ϵ_s ist der Wirkungsgrad der kontaminierten Oberfläche (s = surface) und enthält somit deren Eigenschaften hinsichtlich Selbstabsorption und Rückstreuung. ϵ_i ist der Wirkungsgrad des Gerätes (i = instrument), den die deutsche Übersetzung von ISO 7503-1 aus welchen Gründen auch immer nicht als Wirkungsgrad bezeichnet, sondern als Ansprechvermögen. Der Wirkungsgrad ϵ_i ist dem Gerät gegenüber gerechter definiert, da er sich nur auf die in den oberen Raumwinkel von 2π in Richtung des Gerätes ausgesandten Teilchen bezieht. Dieser Wirkungsgrad wird daher auch als » 2π -Wirkungsgrad« bezeichnet. Unter dieser Definition kann ein ideales Gerät einen Wirkungsgrad nahe 100% erreichen (nur der Anteil q_5 wird nicht erkannt, da auch ein ideales Gerät immer einen Rand hat). Der Vorteil von DIN ISO 7503-1 ist also, dass die Verhältnisse genauer beschrieben werden. Der Nachteil ist jedoch, dass der Anwender jetzt mit zwei Parametern je Radionuklid umgehen muss. Während sich der Geräteparameter ϵ_i im Prinzip beliebig genau bestimmen lässt, ist der Quellenparameter ϵ_s zunächst unbekannt. DIN ISO 7503-1 empfiehlt die Annahme folgender Werte:

- $\epsilon_s = 0,5$ für Beta-Strahler mit einer maximalen Beta-Energie größer 0,4 MeV,
- $\epsilon_s = 0,25$ für Alpha-Strahler sowie Beta-Strahler mit einer maximalen Beta-Energie zwischen 0,15 MeV und 0,4 MeV (für Beta-Strahler mit einer maximalen Beta-Energie kleiner 0,15 MeV gilt DIN ISO 7503-1 nicht).

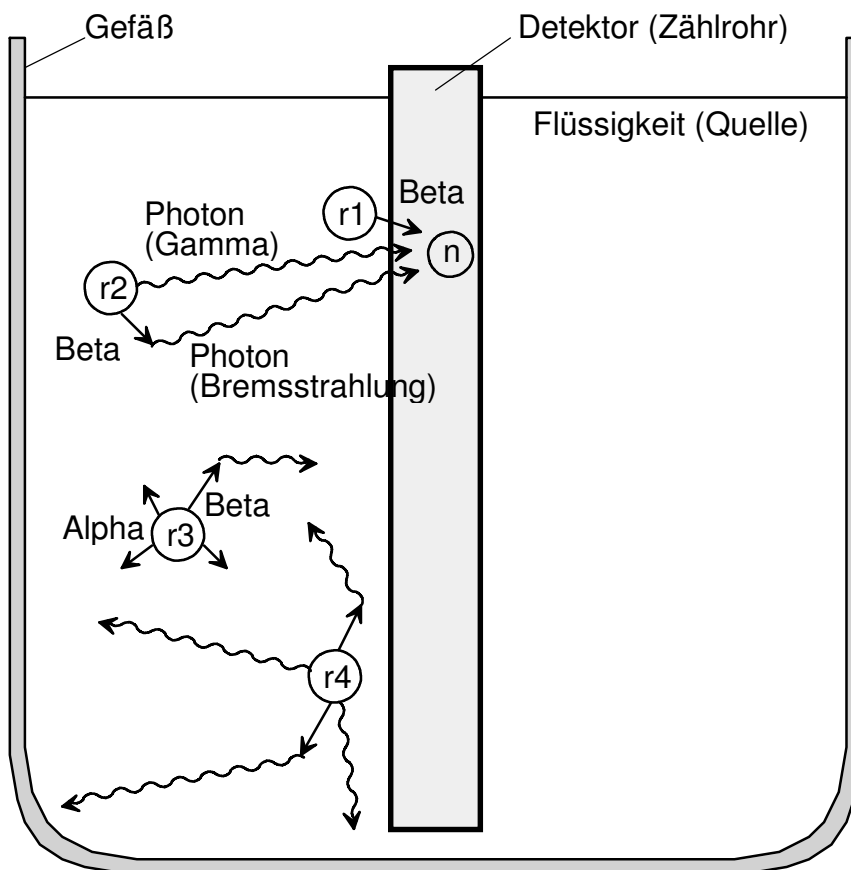
Diese Abstufungen sind recht grob. Sie spiegeln wider, dass die ungenaue Kenntnis der Eigenschaften der Quelle immer zu Unsicherheiten beim Messergebnis führt. Diese Unsicherheiten lassen sich auch durch noch so wohl überlegte Definitionen nicht aus der Welt schaffen.

Es stellt sich die Frage, nach welcher Norm man vorgehen sollte. Wir haben uns für den konventionellen 4π -Wirkungsgrad entschieden, weil uns dies für die Praxis einfacher erscheint. Für jedes Radionuklid wird also nur ein einziger Umrechnungsfaktor bestimmt ($\epsilon_{4\pi}$). Dabei wird in Kauf genommen, dass dieser Faktor die Eigenschaften der Quelle als Unsicherheit in sich birgt. Diese Unsicherheit ist bei der DIN ISO 7503-1 in anderer Form auch vorhanden, nämlich in der Annahme für ϵ_s . In der Terminologie der DIN ISO 7503-1 bedeutet dies, dass wir nur den einen Faktor $R_i (= \epsilon_s \cdot \epsilon_i = \epsilon_{4\pi})$ verwenden, den wir mit Hilfe von Referenzquellen ermitteln.

2.4 Messung einer volumenbezogenen Kontamination

Bei der Messung einer Volumenkontamination spielt die Selbstabsorption der Quelle eine entscheidende Rolle. Alpha-Strahlen und ein großer Anteil der Beta-Strahlen werden innerhalb des Volumens absorbiert, bevor sie zum Detektor gelangen können. Bei Betastrahlung (nicht bei Alphastrahlung) wird der Nachweis auf indirekte Weise durch die Bremsstrahlung erleichtert^A. Photonenstrahlung hat wegen ihres hohen Durchdringungsvermögens zwar eine gute Chance, bis zum Detektor zu gelangen, kann diesen aus dem gleichen Grund aber auch durchdringen, ohne ein Ereignis auszulösen.

Nehmen wir an, ein radioaktiver Stoff sei gleichmäßig in einer Flüssigkeit gelöst. Diese Flüssigkeit befinde sich in einem Gefäß, in der Mitte sei ein Detektor eingetaucht. Diese Anordnung entspricht der Sonde 6150AD-19. Wie bei der Oberflächenkontamination teilen wir die von der Quelle ausgesandten Teilchen entsprechend ihrem Schicksal in Gruppen ein:



Definitionen:

Aktivität der Quelle:

$$A = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

V = Volumen der Flüssigkeit in l (Liter)

M = Masse der Flüssigkeit in g

Spezifische Aktivität:

$$A_s = A/M \text{ in Bq/g}$$

Volumenkontamination:

$$A_v = A/V \text{ in Bq/l}$$

n = die im Messgerät erzeugte Impulsrate

Wirkungsgrad des Messgerätes:

$$\varepsilon = n / A$$

Diese Einteilung in die Anteile r1 bis r4 sowie die Definitionen entstammen nicht einer Norm, sondern sind unsere Festlegungen. Die Anteile r1 bis r4 haben folgende Bedeutung:

- r1, r2: Teilchen und deren Folgeprodukte, die den Detektor erreichen. Beta-Teilchen können wegen ihrer geringen Reichweite den Detektor nur erreichen, wenn sie aus der unmittelbaren Nachbarschaft des Detektors stammen (r1). Photonenstrahlung (Gamma- und Bremsstrahlung, r2) kann auch dickere Flüssigkeitsschichten durchdringen, kann aber auch den Detektor durchdringen und somit kein Ereignis im Detektor auslösen. Deswegen ist die Ereignisrate n ziemlich klein.
- r3: Teilchen und deren Folgeprodukte, die ganz in der Flüssigkeit absorbiert werden und daher nicht zum Detektor gelangen.
- r4: Teilchen und deren Folgeprodukte, die den Detektor aus geometrischen Gründen verfehlen.

^A Bremsstrahlung ist Photonenstrahlung, die beim Abbremsen von Elektronen (Beta-Teilchen) entsteht.

Im Vergleich zur Oberflächenkontamination fällt sofort auf, dass eine Volumenkontamination viel schwieriger nachzuweisen ist, weil die Selbstabsorption hoch und die Geometrie ungünstig ist. Der Wirkungsgrad eines Messgerätes für Volumenkontamination in der gezeigten Anordnung erreicht auch unter günstigen Umständen kaum mehr als einige Prozent. Dies erklärt sich durch:

1. die geringe Nachweiswahrscheinlichkeit für Photonenstrahlung (Anteil r2), selbst wenn diese den Detektor erreicht,
2. die unvermeidlich hohe Selbstabsorption (Anteil r3),
3. die ungünstige Geometrie (Anteil r4).

Alpha-Strahlen haben in einer Flüssigkeit eine so geringe Reichweite, dass sie vollständig in der Flüssigkeit absorbiert werden. Es macht daher keinen Sinn, den Detektor mit großem Aufwand so zu konstruieren, dass er auch Alpha-Strahlen erkennt, weil selbst dann für Alpha-Strahlen der Anteil r1 verschwindend klein wäre. Eine reine Alpha-Kontamination kann nach diesem Verfahren nicht nachgewiesen werden. Gleiches gilt für Tritium, das ebenfalls Strahlung mit extrem geringer Reichweite aussendet (Betastrahlung mit einer Maximalenergie von nur 18,6 keV). Für den Nachweis solcher Kontaminationen müssen andere Verfahren benutzt werden, z.B. das Vermischen des zu untersuchenden Stoffes mit einem flüssigen Szintillator. In manchen Fällen ist auch denkbar, die Volumenkontamination durch Filtrieren oder Verdampfen in eine besser zu messende Oberflächenkontamination umzuwandeln.

Der Nachweis von Betastrahlung wird durch die Bremsstrahlung etwas erleichtert. Vielleicht fragen Sie sich, warum die Bremsstrahlung bei der Diskussion der Oberflächenkontamination nicht erwähnt wurde, obwohl sie dort natürlich auch vorkommt. Dies liegt daran, dass bei einer Oberflächenkontamination, d.h. bei relativ geringer Selbstabsorption, die Anzahl der im Detektor durch Bremsstrahlung ausgelösten Ereignisse gering ist im Vergleich zur Anzahl der direkt durch die Beta-Teilchen ausgelösten Ereignisse. Bei einer Volumenkontamination hingegen ist die Bremsstrahlung ein wichtiger, vielleicht sogar der dominante Effekt zum Nachweis einer Beta-Kontamination.

Wenn es sich bei dem kontaminierten Volumen um einen massiven festen Körper handelt (z.B. Stahl, bei dessen Herstellung versehentlich radioaktiver Schrott mit eingeschmolzen wurde), muss das Problem ganz anders angegangen werden. Ein solcher Gegenstand wird nach außen nur dann merklich strahlen, wenn er (auch) mit einem Gammastrahler kontaminiert ist, da Alpha- und Betastrahlen fast vollständig im Innern des Gegenstandes absorbiert werden. In einem solchen Fall macht es wenig Sinn, an der Oberfläche nach Alpha- oder Betastrahlung zu suchen. Man wird eher versuchen, das Nuklid zu bestimmen und von der Gamma-Dosisleistung auf die Aktivität zu schließen. Außerdem wird von einem solchen Gegenstand ein Risiko mehr durch äußere Bestrahlung als durch Inkorporation ausgehen. Zur Einschätzung dieses Risikos ist dann die Gamma-Dosisleistung in der Umgebung des Gegenstandes maßgebend, und nicht die in ihm enthaltene Aktivität (zumindest solange er nicht bearbeitet wird und inkorporierbares Material wie Staub entsteht).

2.5 Abgrenzung zwischen Oberflächen- und Volumenkontamination

In der Praxis stellt sich die Frage, ob es sich bei einer Kontamination um eine Oberflächen- oder Volumenkontamination handelt, und mit welcher Messtechnik dann diese Kontamination zu erfassen sei.

Um eine Oberflächenkontamination *quantitativ* zu erfassen, darf die Selbstabsorption nicht zu ausgeprägt sein. Daher müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Oberfläche muss so hart sein, dass kein wesentlicher Anteil der Kontamination in die Oberfläche eingedrungen ist. Diese Bedingung wird im Allgemeinen von Werkstoffen wie Metall, Kunststoff oder auch lackiertem Holz erfüllt, und gilt damit für Gegenstände wie Werkzeuge, Arbeitsplatten und Ähnliches. Wenn es sich jedoch um eine poröse Oberfläche handelt, durch die bereits ein beachtlicher Teil der Kontamination in das Innere gelangt ist, hat man es bereits mit einer Volumenkontamination zu tun.
2. Die Oberfläche muss trocken sein, da Feuchtigkeit insbesondere bei Alphastrahlern bereits eine beachtliche Selbstabsorption in der Quelle bewirken kann.
3. Die Oberfläche muss glatt sein, damit man von einer nur geringen Selbstabsorption der Quelle ausgehen kann. Dies ist im Allgemeinen erfüllt, wenn die Oberfläche des zu untersuchenden Gegenstandes sauber oder nur leicht verstaubt wirkt. Wenn die Oberfläche jedoch eine dicke Schmutzschicht trägt, oder z.B. im Falle von Metallen stark verrostet ist, kann es sich bereits um eine Volumenkontamination der Schmutzschicht handeln.

Nur wenn alle diese Bedingungen erfüllt sind, lässt sich eine Oberflächenkontamination richtig messen. Andernfalls wird man die Oberflächenkontamination zwar nicht unbedingt übersehen, aber doch zumindest unterschätzen.

Dies bedeutet in der Praxis jedoch nicht, dass man sofort zu der Messung der Volumenkontamination schreiten sollte, wenn eine der genannten Bedingungen nicht erfüllt ist. Es würde wenig Sinn machen, eine kontaminierte Schmutz- oder Rostschicht abzukratzen, sie durch Auflösen in eine flüssige Form zu überführen, und dann die in dieser Flüssigkeit vorhandene Aktivität zu messen. Dieses Verfahren wäre nicht nur aufwändig, sondern wohl auch ziemlich ungenau, weil aus zuvor genannten Gründen die genaue Messung einer Volumenkontamination recht schwierig ist. In der Praxis wird man eine Volumenkontamination vorrangig an solchen Objekten messen, die von Hause aus »voluminös« sind und gar keine abgrenzende Oberfläche haben, wie z.B. Flüssigkeiten.

Wenn man eine Oberflächenkontamination festgestellt hat, lautet das Ziel meistens nicht, diese Oberflächenkontamination genau zu messen, sondern die Oberfläche zu dekontaminieren, d.h. so lange zu reinigen, bis keine oder nur noch fest haftende Kontamination vorliegt (dabei Handschuhe tragen!). Nach dieser gründlichen Reinigung ist die Oberfläche automatisch so sauber und glatt, dass sie die oben genannten Bedingungen 2. und 3. erfüllt, und dass die nach der Reinigung verbleibende Oberflächenkontamination mit brauchbarer Genauigkeit ermittelt werden kann.

2.6 Wischtest

Kontamination kann teilweise fest an der Oberfläche haften und teilweise abwischbar sein. Abwischbare Kontamination stellt die größere Gefahr dar. Um festzustellen, ob ein Teil der Kontamination abwischbar ist, bedient man sich des Verfahrens des »Wischtests«: Man wischt die Oberfläche mit einem Stück sauberen Papiers ab (z.B. mit Filterpapier oder einem Papierhandtuch) und untersucht danach das Papier. Falls sich auf der Oberfläche eine abwischbare Kontamination befindet, muss sich diese zum Teil auf das Papier übertragen und dort nachweisen lassen. Weiterhin stellt der Wischtest eine Möglichkeit dar, auf abwischbare Kontamination zu prüfen, wenn die zu untersuchende Oberfläche so schwer zugänglich ist, dass man das Messgerät nicht direkt in ihre Nähe bringen kann.

Die Kontamination des Papiers lässt sich auf die Oberflächenkontamination der abgewischten Fläche umrechnen. Zunächst ist darauf zu achten, dass so gewischt wird, dass die kontaminierte Fläche des Papiers nicht größer ist als die Fläche des Detektors, mit dem das Papier danach untersucht wird. Weiterhin muss die Größe der abgewischten Fläche bekannt sein, z.B. indem eine quadratische Fläche von 10 cm x 10 cm = 100 cm² abgewischt wird. Der (möglicherweise) kontaminierte Teil des Papiers wird dann unter den Detektor gelegt und somit die gesamte abgewischte Kontamination bestimmt. Dann lässt sich die Oberflächenkontamination der abgewischten Fläche wie folgt berechnen:

$$\text{Oberflächenkontamination} = \frac{\text{abgewischte Kontamination [Bq]}}{\text{abgewischte Fläche [cm}^2\text{]}} / \text{Entnahmefaktor}$$

Der Entnahmefaktor berücksichtigt, dass beim Wischen nur ein Teil der Oberflächenkontamination »entnommen« und auf das Papier übertragen wird. Als (konservative) Abschätzung empfiehlt DIN ISO 7503-1 einen Entnahmefaktor von 0,1, d.h. es wird angenommen, dass nur 10% der Kontamination abgewischt wurden. Aufgrund der Unsicherheiten solcher Annahmen kann die so berechnete Oberflächenkontamination immer nur eine grobe Abschätzung sein.

Hinweis: Intuitiv möchte man vermuten, dass Wischen mit einem feuchten Papier zu einer höheren Entnahme und somit zu einer besseren Nachweisempfindlichkeit führt. Was die Entnahme betrifft, ist dies sicherlich auch korrekt. Allerdings kann die abgewischte Kontamination bei einem feuchten Papier viel leichter in dessen poröse Struktur eindringen und ihre Strahlung somit bereits im Papier absorbiert werden. Man hat dann zwar mehr Kontamination auf bzw. in dem Papier, kann diese dann aber zu einem noch größeren Teil hinterher gar nicht nachweisen, und somit letztlich die Kontamination unterschätzen. Das zum Wischen benutzte Papier sollte daher immer trocken sein.

2.7 Kondenswasser auf dem Detektorfenster

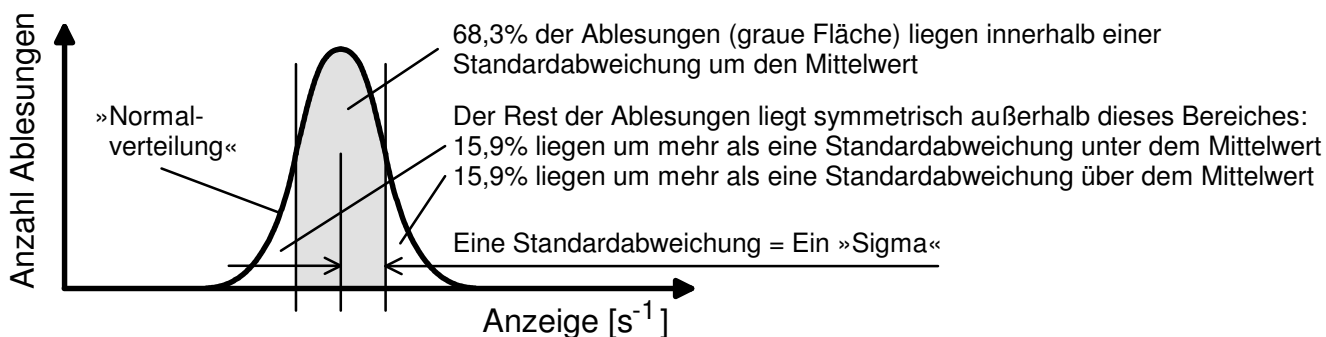
Es wurde bereits mehrfach auf die Gefahr hingewiesen, eine Kontamination zu unterschätzen, weil ein Teil der Strahlung bereits vor Eintritt in den Detektor absorbiert wird. Kondenswasser auf dem Detektorfenster, sogar in Form eines leichten Beschlages, zählt zu diesen möglichen Fehlerquellen. Falls klimatische Bedingungen herrschen, die die Bildung von Kondenswasser fördern, wie z.B. die Verbringung des Gerätes von einem kühlen in einen feuchtwarmen Raum, muss vor einer Messung das Abtrocknen der Feuchtigkeit abgewartet werden.

3. Statistische Schwankungen und Ablesegenauigkeit

Das vorige Kapitel hat gezeigt, dass es keinesfalls sehr einfach ist, aus der Anzeige eines Messgerätes die Kontamination zu bestimmen, selbst wenn man das Messgerät als ideal kalibriert betrachten kann. Doch damit nicht genug: Es ist außerdem nicht einfach, die Anzeige des Messgerätes selbst zu bestimmen, weil statistische Schwankungen der Anzeige eine genaue Ablesung erschweren. Diese Problematik soll jetzt näher besprochen werden (Grundlagen der Statistik finden sich in DIN 1319). Wie das vorige richtet sich auch dieses Kapitel in erster Linie an Anwender, die mit dem Thema nicht sehr vertraut sind.

3.1 Die Standardabweichung »Sigma«

Es werde ein Messgerät, welches eine Impulsrate in s^{-1} (Impulse pro Sekunde) anzeigt, unter konstanten Bedingungen beobachtet. Wenn man die Häufigkeit der statistisch schwankende Anzeigewerte in einem Diagramm aufträgt, wird man bei nicht zu kleinen Impulsraten eine symmetrische glockenförmige Verteilung um den Mittelwert feststellen. Diese Verteilung wird in der Theorie der Statistik als Normalverteilung bezeichnet (in Abschnitt 3.3 findet sich ein praktisches Beispiel hierzu).



Die Breite dieser Verteilung, d.h. das Ausmaß der Schwankungen, wird mit der so genannten Standardabweichung gemessen. Die Standardabweichung ist um so kleiner, je länger die Messdauer (bzw. die Zeitkonstante des Messgerätes) ist. Wir werden die Standardabweichung im Folgenden »Sigma« nennen, weil dies der Name des griechischen Buchstaben σ ist, der in der Theorie der Statistik als Symbol für die Standardabweichung verwendet wird. Sigma wird in der gleichen Einheit gemessen wie der Messwert, im obigen Beispiel also in s^{-1} . Daneben gibt es noch die relative Standardabweichung, im Folgenden »Sigma-rel« genannt. Sigma-rel ist der Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert und wird in Prozent angegeben (und wird auch als »Variationskoeffizient« bezeichnet).

In der obigen Skizze ist angegeben, wie viele der Ablesungen innerhalb oder außerhalb eines Sigma liegen. Es stellt sich die Frage, wie viele Sigmas erforderlich sind, damit die graue Fläche in obiger Skizze z.B. 90% aller Ablesungen umfasst. Dies ist nicht einfach zu berechnen; daher sind in nachfolgender Tabelle einige ausgewählte Werte zusammengestellt, von denen wir später noch einige benötigen werden:

Anzahl Sigmas	Anteil der grauen Fläche (»Vertrauensniveau«)
1,000	68,3 %
1,645	90,0 %
1,960	95,0 %
2,000	95,5 %
2,576	99,0 %
3,000	99,7 %

Auf die Frage, wie Sigma ermittelt wird, gehen wir später in den Abschnitten 3.4.1 und 3.4.3 ein.

3.2 Vertrauensniveau und Fehlerwahrscheinlichkeit

Das Vertrauensniveau gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Aussage richtig ist. Eine solche Aussage ist z.B.: »Die Impulsrate beträgt $(6 \pm 1) \text{ s}^{-1}$ «. Allgemein wird ein Vertrauensniveau von 95% empfohlen, was etwa zwei Sigma (genau: 1,96 Sigma) entspricht, siehe die Tabelle im vorigen Abschnitt. Dann sind nur 5% aller Aussagen falsch, was als tolerierbar empfunden wird (das wünschenswerte Vertrauensniveau von 100%, d.h. absolute Sicherheit, ist nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit nie erreichbar).

Beispiel: Ein 6150AD6 mit Sonde zeigt im Modus »Mittelwert« eine Impulsrate von 30 s^{-1} und ein Sigma-rel von 10% an. Dann gilt mit einem Vertrauensniveau von 95% (zwei Sigma) folgende Aussage: »Die Impulsrate beträgt $30 \text{ s}^{-1} \pm 20\%$, d.h. $(30 \pm 6) \text{ s}^{-1}$ «. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Aussage falsch ist, die »Fehlerwahrscheinlichkeit« oder auch »Irrtumswahrscheinlichkeit«, beträgt dann 5%.

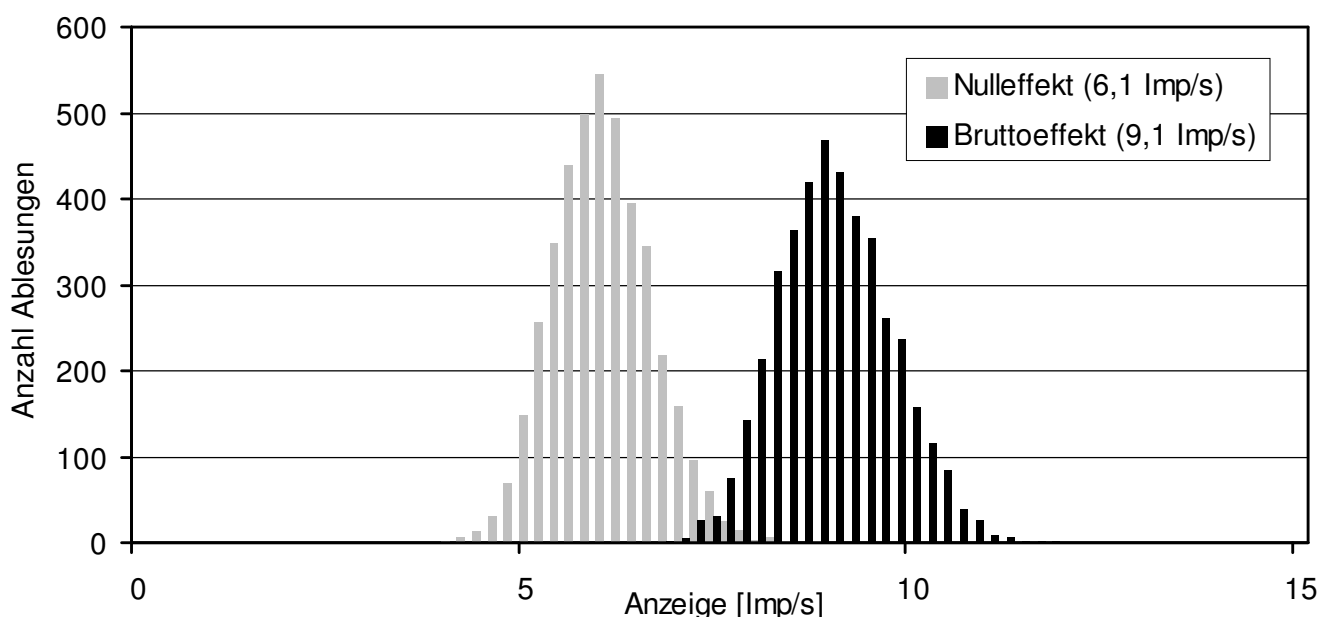
3.3 Nulleffekt, Bruttoeffekt und Nettoeffekt

Auch wenn sich keine radioaktive Probe in der Nähe des Messgerätes befindet, hat dieses eine gewisse Anzeige ungleich Null. Dieser so genannte Nulleffekt wird durch einen oder mehrere folgender Effekte hervorgerufen:

1. Natürliche oder auch künstliche Umgebungsstrahlung,
2. natürliche radioaktive Einschlüsse im Detektormaterial,
3. Kontamination des Messgerätes selbst,
4. elektronische Eigeneffekte.

Wenn eine radioaktive Probe an das Messgerät gebracht wird, erhöht sich die Anzeige. Der Wert, um den sich die Anzeige erhöht, kommt von der Probe, und nur dieser Wert darf zur Bestimmung der Kontamination herangezogen werden.

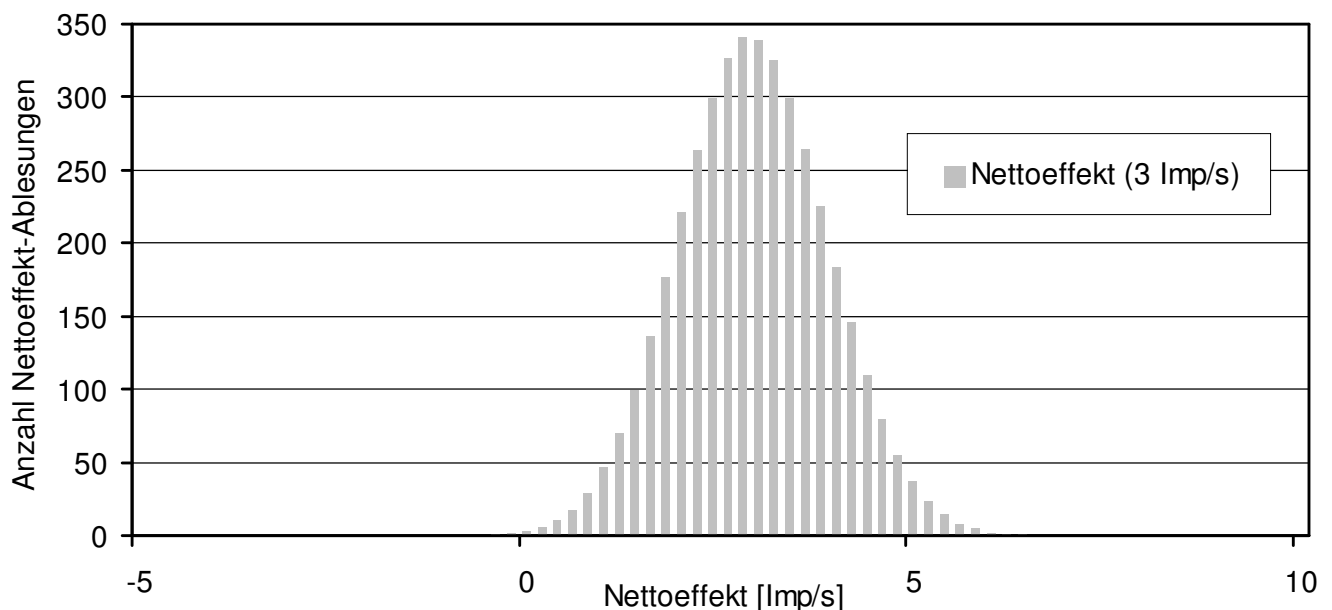
Dies klingt zunächst recht einfach und plausibel. Man misst zunächst den Nulleffekt (Anzeige ohne Probe), dann den Bruttoeffekt (Anzeige mit Probe), und bildet dann die Differenz, den so genannten Nettoeffekt (Bruttoeffekt minus Nulleffekt). Die statistischen Schwankungen können hierbei jedoch zu beträchtlichen Ablesefehlern führen. Die nachfolgende Grafik zeigt ein praktisches Beispiel:



Die Daten aus dieser Grafik wurden mit einem 6150AD6 und einer Kontaminationsnachweissonde 6150AD-k in der Betriebsart »Alpha-Beta-Gamma« experimentell wie folgt bestimmt:

- Graue Balken: Nulleffekt, d.h. Anzeige ohne radioaktive Probe in der Nähe des Gerätes. Das Gerät wurde im Zustand »Dosisleistungsanzeige« (bzw. im vorliegenden Fall »Impulsratenanzeige«) für etwas mehr als eine Stunde im Sekundentakt abgelesen. Dies sind etwa 4000 Ablesungen. Die grauen Balken geben die Häufigkeiten der einzelnen Ablesungen wieder, eingeteilt in Intervalle von $0,2 \text{ s}^{-1}$. Der Mittelwert der Ablesungen beträgt $6,1 \text{ s}^{-1}$. Das aus den 4000 Ablesungen nach der Formel (2d) aus Abschnitt 3.4.3 berechnete Sigma beträgt $0,62 \text{ s}^{-1}$.
- Schwarze Balken: Bruttoeffekt, d.h. Anzeige mit einer radioaktiven Probe in der Nähe des Gerätes. Auch hier wurde etwa 4000 mal im Sekundentakt abgelesen. Der Mittelwert der Ablesungen beträgt $9,1 \text{ s}^{-1}$ bei einem Sigma von $0,74 \text{ s}^{-1}$. Der Nettoeffekt beträgt also $9,1 \text{ s}^{-1} - 6,1 \text{ s}^{-1} = 3,0 \text{ s}^{-1}$.

Man erkennt den Effekt der radioaktiven Probe deutlich daran, dass die Bruttoeffektanzeige im Mittel höher liegt als die Nulleffektanzeige. Man erkennt aber auch, dass sich die beiden Verteilungen überlappen. Was bedeutet dies nun für die Praxis? Angenommen, man liest in der Praxis nur zweimal ab, und zwar zuerst den Nulleffekt (Wahrscheinlichkeitsverteilung graue Balken) und dann den Bruttoeffekt (schwarze Balken). Aus diesen beiden Ablesungen bestimmt man den Nettoeffekt als Differenz. Diese Prozedur werde sehr oft wiederholt. Der nach dieser Prozedur ermittelte Nettoeffekt ist noch größeren Schwankungen unterworfen als die beiden Einzelmessungen, siehe die folgende Grafik (Nullpunkt der x-Achse beachten!):



Der Mittelwert der Nettoeffekt-Ablesungen beträgt $3,0 \text{ s}^{-1}$. Das nach der Formel (2d) aus Abschnitt 3.4.3 berechnete Sigma beträgt $0,97 \text{ s}^{-1}$. Dies war auch theoretisch aus den Sigmas von Bruttoeffekt und Nettoeffekt zu erwarten, siehe Abschnitt 3.5.

Diese Grafik zeigt: In vielen Fällen wird man »Glück« haben und für den Nettoeffekt einen brauchbaren Wert in der Nähe des wahren Wertes von 3 s^{-1} ermitteln. Es kommen aber auch Ergebnisse vor, die deutlich größer sind (5 s^{-1} und mehr), oder die nahe bei Null liegen. Man sogar »großes Pech« haben und einen negativen Nettoeffekt ermitteln, also die radioaktive Probe völlig übersehen! Diese Problematik werden wir jetzt genauer betrachten.

3.4 Erkennungs- und Nachweisgrenze

Im Zusammenhang mit Kontaminationsmessungen wird von einer Erkennungsgrenze und einer Nachweisgrenze gesprochen. Diese beiden Größen haben folgende Bedeutung:

- **Erkennungsgrenze:** Bei einer Messung muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, ob eine Kontamination vorliegt oder nicht. Eine Kontamination gilt als vorhanden, wenn ein Messwert die so genannte Erkennungsgrenze überschreitet. Bei Geräten mit einstellbarer Warnschwelle eignet sich die Erkennungsgrenze als Wert für die Warnschwelle.
- **Nachweisgrenze:** Aus der Erkennungsgrenze ergibt sich die kleinste noch mit einem bestimmten Vertrauensniveau erkennbare Kontamination. Dies ist die so genannte Nachweisgrenze. Sie ist immer größer als die Erkennungsgrenze. Die Nachweisgrenze gibt an, ob ein Gerät für einen bestimmten Zweck geeignet ist. Wenn z.B. in einer gesetzlichen Vorschrift festgelegt ist, dass eine Kontamination einen bestimmten Richtwert nicht überschreiten darf, so darf die Nachweisgrenze des Messgerätes nicht größer als dieser Richtwert sein, wenn das Messgerät geeignet sein soll, die Einhaltung des Richtwertes zu belegen.

Das Verständnis beider Größen setzt Kenntnisse zu Begriffen wie Messdauer, Zeitkonstante und Berechnung von Sigma voraus. Wir werden daher auch diese Begriffe zunächst kurz diskutieren. Dabei halten wir uns an DIN 25482-1 (international entspricht dies ISO 11929-1) sowie die Empfehlung der SSK (Strahlenschutzkommission) »Anforderungen an die Kontaminationskontrolle beim Verlassen eines Kontrollbereiches (§44 der Strahlenschutzverordnung)«, verabschiedet am 28.02.2002. Allerdings werden wir vorrangig diejenigen Teile der Normen betrachten, die auf unsere Kontaminationssonden angewandt werden können, und wir werden diese Betrachtungen so einfach wie möglich halten. Wer noch tiefer in diese Diskussion einsteigen möchte, dem bleibt ein Studium der Normen nicht erspart.

3.4.1 Berechnung von Sigma bei Impulzzählung

Wenn eine Impulsrate R (in s^{-1}) vorliegt, und man zählt die Impulse während einer Messdauer T (in s), so ergibt sich eine gesamte Impulszahl $N = R \cdot T$. Dann lässt sich Sigma aus dieser Impulszahl N wie folgt berechnen:

$$\text{Sigma} = \sqrt{N} \quad (1a)$$

$$\text{d.h. Sigma-rel} = \frac{\text{Sigma}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (1b)$$

Diese Formeln gelten allerdings nur, wenn man von einer Normalverteilung ausgehen kann. Dies ist etwa ab $N = 10$ gut erfüllt.

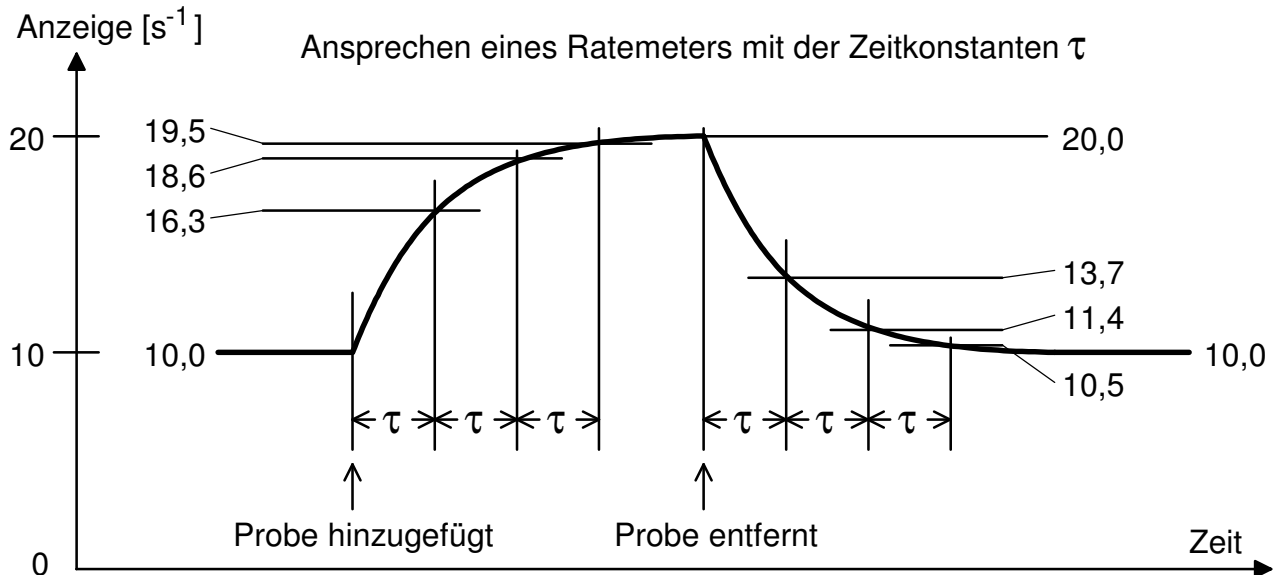
3.4.2 Messdauer bei einem Ratemeter

Ein Ratemeter ist ein Gerät, das eine Impulsrate (eventuell versehen mit einem Kalibrierfaktor) anzeigt. Im Zustand »Dosisleistungsanzeige« (bzw. »Impulsratenanzeige«) ist auch das 6150AD ein Ratemeter. Ein Ratemeter hat eine gewisse Zeitkonstante, um statistischen Schwankungen der Anzeige zu vermindern. Die Zeitkonstante hat die Bedeutung einer Messdauer. Je größer die Zeitkonstante, um so geringer die Schwankungen (und um so langsamer die Antwort des Ratemeters auf Veränderungen der Impulsrate). Nun kann es vorkommen, dass man auf eine Formel stößt, in die man einen Wert für die Messdauer einsetzen muss. Dann stellt sich die Frage, was denn bei einem Ratemeter als Messdauer gelten kann. Die Antwort lautet: Die »effektive« Messdauer eines Ratemeters mit der Zeitkonstanten τ ist gerade das Doppelte der Zeitkonstante:

$$\text{Effektive Messdauer eines Ratemeters} = 2 \cdot \tau.$$

WICHTIG: Bevor das Ratemeter abgelesen wird, muss ihm eine gewisse Zeit zugestanden werden, sich auf den (neuen) Wert einzustellen. Es wird empfohlen, mindestens drei Zeitkonstanten zu warten, da das Ratemeter nach drei Zeitkonstanten bereits 95% einer plötzlichen Änderung des wahren Wertes registriert hat.

Beispiel: Mit einer radioaktiven Probe steige die Anzeige eines Ratemeters von 10 s^{-1} auf 20 s^{-1} an. Die nachfolgende Skizze zeigt den zeitlichen Verlauf der Anzeige (statistische Schwankungen der Anzeige nicht dargestellt):



Natürlich ist es mühsam, »lange« zu warten, bevor man den Wert abliest. Bedenken Sie jedoch, dass Sie mit der Wartezeit von $3 \cdot \tau$ eine effektive Messdauer von $2 \cdot \tau$ erreichen. Das Warten ist also keineswegs umsonst, sondern dient der genaueren Ablesung.

3.4.3 Berechnung von Sigma bei einem Ratemeter

Ein Ratemeter mit der Zeitkonstanten τ hat bei der Impulsrate R ein effektives $N = 2 \cdot \tau \cdot R$. Dann sieht die Formel (1b) aus Abschnitt 3.4.1 für das Ratemeter wie folgt aus:

$$\text{Sigma-rel} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{2\tau R}} \quad (2a)$$

Allerdings zeigt nicht jedes Ratemeter unbedingt direkt die Impulsrate des Detektors an. Möglicherweise wird die Impulsrate R mit einem Umrechnungsfaktor F (z.B. Kalibrierfaktor) multipliziert, bevor sie als Anzeigewert D (»display«) zu Anzeige kommt:

$$D = F \cdot R \quad \text{bzw. bei Nulleffekt: } D_0 = F \cdot R_0$$

Den Faktor F ändert nichts an der relativen Standardabweichung Sigma-rel , wohl aber an der absoluten Standardabweichung Sigma . Wegen $\text{Sigma} = \text{Sigma-rel} \cdot D$ gilt dann:

$$\text{Sigma} = D \sqrt{\frac{F}{2\tau \times D}} = \sqrt{\frac{F \times D}{2\tau}} \quad (2b)$$

Besondere Bedeutung hat die Standardabweichung Sigma_0 der Nulleffektanzeige D_0 :

$$\text{Sigma}_0 = \sqrt{\frac{F \times D_0}{2\tau}}$$

$\Sigma\sigma_0$ ist für Erkennungs- und Nachweisgrenze das entscheidende Maß, weil beide ein Vielfaches von $\Sigma\sigma_0$ sind. $\Sigma\sigma_0$ wird uns im Folgenden noch öfter begegnen.

Um Formel (2b) anwenden zu können, benötigt man Angaben zu F und τ des Messgerätes. Im Falle des 6150AD kann man auf diese Formel verzichten, indem man das Kapitel »Zeitkonstante und Standardabweichung« in der Gebrauchsanweisung des 6150AD konsultiert. Dort ist in einer Grafik für alle Detektoren angegeben, wie Sigma-rel vom Anzeigewert D abhängt. Diese Grafik ist nichts anderes als eine grafische Darstellung von Formel (2b), wobei der Umrechnungsfaktor F in den verschiedenen x -Achsen der Detektoren enthalten ist. Mit Hilfe des aus der Grafik abgelesenen Sigma-rel kann man dann Sigma wie folgt berechnen:

$$\Sigma\sigma = \Sigma\sigma\text{-rel(aus Gebrauchsanweisung)} \cdot D \quad (2c)$$

Wenn man die Zeitkonstante und den Faktor F nicht kennt, weil man es mit einem »unbekannten« Ratemeter zu tun hat, lässt sich Sigma nur experimentell bestimmen. Hierzu wird das Ratemeter längere Zeit beobachtet und in gewissen Zeitabständen abgelesen. 100 Ablesungen im Abstand von 10 Sekunden werden in den allermeisten Fällen gute Ergebnisse liefern. Dann ist:

$$\Sigma\sigma = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}} \quad (2d)$$

Hierbei ist:

- n die Anzahl der Ablesungen,
 $\sum x^2$ die Summe der Quadrate der abgelesenen Werte,
 $(\sum x)^2$ das Quadrat der Summe der abgelesenen Werte.

Diese Formel ist in manchen wissenschaftlichen Taschenrechnern eingebaut. Diese Formel gilt auch, wenn das untersuchte Gerät einen Umrechnungsfaktor F verwendet.

Fazit: Es gibt mehrere Möglichkeiten, Sigma zu bestimmen. Am Beispiel der Nulleffektanzeige D_0 der Sonde 6150AD-k zeigen wir drei gleichwertige Methoden auf, $\Sigma\sigma_0$ zu bestimmen:

1. Unter Anwendung von Formel (2b) mit $D_0 = 6 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 8 \text{ s}$ und $F = 1$:

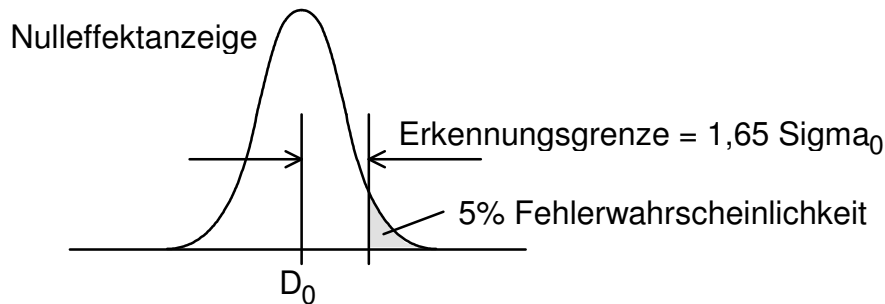
$$\Sigma\sigma_0 = \sqrt{\frac{6 \text{ s}^{-1}}{2 \times 8 \text{ s}}} = 0,61 \text{ s}^{-1} \quad (6150AD\text{-k im Modus } \alpha\beta\gamma)$$

Die Angabe $\tau = 8 \text{ s}$ ist hierbei der Gebrauchsanweisung des 6150AD entnommen. Die Angabe $F = 1$ stammt aus den technischen Daten der 6150AD-k.

2. Unter Anwendung von Formel (2c): Aus der Gebrauchsanweisung des 6150AD liest man für die Sondenfamilie 6150AD-0 (zu der auch die 6150AD-k gehört) bei einer Anzeige von $D_0 = 6 \text{ s}^{-1}$ ein Sigma-rel von 10% ab. Also ist $\Sigma\sigma_0 = 10\% \cdot 6 \text{ s}^{-1} = 0,6 \text{ s}^{-1}$.
3. Experimentell (siehe Abschnitt 3.3) unter Anwendung von Formel (2d). Das Ergebnis war $\Sigma\sigma_0 = 0,62 \text{ s}^{-1}$. Dieses Verfahren ist natürlich mühsam, aber unkompliziert und am sichersten, wenn Zweifel an der Anwendbarkeit einer Formel bestehen. Es ist das einzig mögliche Verfahren, wenn keine Angaben zu F und τ vorliegen.

3.4.4 Definition der Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze ist definiert als derjenige Grenzwert, aus dessen Überschreitung (mit einer bestimmten Fehlerwahrscheinlichkeit) gefolgert wird, dass eine Kontamination vorliegt. Die Erkennungsgrenze hängt nur vom Nulleffekt, von der Messdauer, und von der zugestandenen Fehlerwahrscheinlichkeit ab. Für die Fehlerwahrscheinlichkeit wird allgemein ein Wert von 5% empfohlen. Dieser Fehler wäre, dass man eine Kontamination erkennt, obwohl gar keine vorhanden ist^A. Dieser Fehler tritt immer dann auf, wenn die Anzeige des Nulleffekts zufällig so hoch ist, dass der Messwert über der Erkennungsgrenze liegt. Also muss die Erkennungsgrenze so bemessen werden, dass 5% der Ablesungen des Nulleffekts über der Erkennungsgrenze liegen:



Wenn 5% der Ablesungen zu hoch liegen, liegen weitere 5% zu tief, was aber im vorliegenden Fall nicht stört. Es wird also ein Vertrauensniveau der Ablesung des Nulleffekts von 90% (*nicht* 95%) gesucht. Nach der Tabelle in Abschnitt 3.1 entspricht dies $1,65 \text{ Sigma}_0$. Also ist die Erkennungsgrenze^B für den Nettoeffekt (Symbol R_n^* gemäß DIN 25482-1):

$$R_n^* = 1,65 \sqrt{\frac{F \times D_0}{2\tau}} = 1,65 \text{ Sigma}_0 \quad (D_0 \text{ wird genau gemessen}) \quad (3a)$$

Diese Formel gilt nur, wenn D_0 und damit Sigma_0 hinreichend genau gemessen werden. »Hinreichend genau« bedeutet, dass die Messdauer für den Nulleffekt D_0 mindestens das zehnfache der Messdauer des Bruttoeffekts im Routinebetrieb betragen soll. Man muss also das Ratemeter mindestens $20 \cdot \tau$ lang bei Nulleffekt beobachten und die Ablesungen mitteln. Das so erhaltene D_0 ist dann in Formel (3a) einzusetzen. Beim 6150AD ist dieses mühsame Verfahren nicht erforderlich, hier kann man D_0 aus der Mittelwertanzeige genau ablesen (Messdauer mindestens $20 \cdot \tau$).

Wenn D_0 nicht besonders genau gemessen wird, sondern mit der gleichen Messdauer wie der Bruttoeffekt, ergibt sich für die Erkennungsgrenze^C:

$$R_n^* = 1,65 \sqrt{\frac{F \times D_0}{\tau}} = 2,33 \text{ Sigma}_0 \quad (D_0 \text{ wird direkt abgelesen}) \quad (3b)$$

Wir wollen die Formel (3a) jetzt auf unser praktisches Beispiel der Sonde 6150AD-k aus Abschnitt 3.3 anwenden. Für die Sonde 6150AD-k ist $F = 1$. Bei dieser Messung waren $D_0 = 6,1 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 8$ Sekunden und $\text{Sigma}_0 = 0,62 \text{ s}^{-1}$. Da D_0 hinreichend genau gemessen wurde, ist nach Formel (3a) die Erkennungsgrenze für den Nettoeffekt gleich $1,65 \cdot 0,62 \text{ s}^{-1} = 1,02 \text{ s}^{-1}$. Also hat die Sonde 6150AD-k eine Erkennungsgrenze für den Nettoeffekt von ca. 1 s^{-1} . Die Erkennungsgrenze für den Bruttoeffekt ist dann $6,1 \text{ s}^{-1} + 1 \text{ s}^{-1} = 7,1 \text{ s}^{-1}$. Wir können also die Warnschwelle der Sonde 6150AD-k auf $7,1 \text{ s}^{-1}$ einstellen, um

^A Die Wahrscheinlichkeit des entgegengesetzten Fehlers, nämlich eine Kontamination zu übersehen, legt die Nachweisgrenze fest, siehe Abschnitt 3.4.5.

^B In DIN 25482-1 werden Sie wesentlich kompliziertere Formeln für die Erkennungsgrenze finden. Die Formel (3a) ist gleichwertig mit der Näherungsformel aus DIN 25482-1, wenn man annimmt, dass $k_{1-\alpha} = 1,65$, $t_0 \gg t_b$ und $t_b = 2\tau$. Ferner nimmt DIN 25482-1 generell an: $F = 1$, d.h. $D_0 = R_0$.

^C Die Formel (3b) ist gleichwertig mit der Näherungsformel aus DIN 25482-1, wenn man annimmt, dass $k_{1-\alpha} = 1,65$ und $t_0 = t_b = 2\tau$. Ferner nimmt DIN 25482-1 generell an: $F = 1$, d.h. $D_0 = R_0$.

möglichst geringe Kontaminationen zu erkennen. Wir müssen dann allerdings damit leben, dass Fehlalarme aufgrund von Schwankungen des Nulleffekts mit einer Häufigkeit von 5% auftreten. Dies bedeutet, dass das Gerät zu 5% der Zeit Alarm abgibt, obwohl gar keine Kontamination vorhanden ist.

Dieses Beispiel zeigt auch, wie wichtig es ist, den Nulleffekt D_0 genau zu kennen. Angenommen, aufgrund einer etwas höheren Umgebungsstrahlung stiege der Nulleffekt von $6,1 \text{ s}^{-1}$ auf $6,5 \text{ s}^{-1}$ an, und die Warnschwelle bliebe bei $7,1 \text{ s}^{-1}$. Dann läge die Warnschwelle nicht mehr 1 s^{-1} über dem Nulleffekt, sondern nur noch $0,6 \text{ s}^{-1}$, also nur noch ca. ein Sigma. Die Häufigkeit von Fehlalarmen würde dann von 5% auf 16% ansteigen, was in der Praxis nicht akzeptabel wäre. Der Nulleffekt muss also nicht nur genau bekannt sein, sondern muss auch in vernünftigen Zeitabständen überprüft werden. Wenn sich der Nulleffekt D_0 geändert hat, z.B. weil sich die Umgebungsbedingungen geändert haben, oder weil das Messgerät leicht kontaminiert wurde, muss die Erkennungsgrenze neu berechnet und die Warnschwelle neu eingestellt werden. Im Idealfall wird der Nulleffekt jedes Mal gemessen bevor ein möglicherweise kontaminiertes Objekt untersucht wird.

Das genaue Messen und Überprüfen des Nulleffekts ist ziemlich aufwändig und erfordert entsprechend geschultes Personal. Es ist wesentlich bequemer, den Nulleffekt genau so direkt abzulesen wie den Bruttoeffekt. Dieser Komfort wird mit einem Verlust an Genauigkeit erkaufte, d.h. mit einer größeren Erkennungsgrenze. Es kommt Formel (3b) zur Anwendung. Nach Formel (3b) ist für die Sonde 6150AD-k die Erkennungsgrenze für den Nettoeffekt gleich $2,33 \cdot 0,62 \text{ s}^{-1} = 1,44 \text{ s}^{-1}$, also ca. $1,5 \text{ s}^{-1}$. Allerdings ist dieser Wert nicht ausreichend, eine Erkennungsgrenze für den Bruttoeffekt (Warnschwelle) festzulegen, weil man hierzu auch den Nulleffekt genau braucht. Vielmehr muss der Benutzer die Feststellung, dass eine Kontamination vorliegt, dann treffen, wenn nach seiner Beobachtung die Anzeige des Gerätes um mindestens die Erkennungsgrenze ansteigt. Dieses Verfahren würde wie folgt aussehen:

1. Es wird eine Erkennungsgrenze von $1,5 \text{ s}^{-1}$ festgelegt, weil man dem Benutzer nicht zumuten kann, vor jeder Messung aus dem abgelesenen D_0 die Erkennungsgrenze neu auszurechnen. Dazu misst man D_0 einmalig etwas genauer und setzt voraus, dass sich D_0 nicht dramatisch ändern wird. Dann wird der Benutzer angewiesen, eine Entscheidung über eine mögliche Kontamination in folgenden Schritten zu treffen:
2. Nulleffekt direkt ablesen, d.h. sich die aktuelle Anzeige des Messgerätes ohne Probe merken.
3. Probe an das Messgerät bringen, mindestens drei Zeitkonstanten (d.h. mindestens 24 Sekunden) warten und dann den Bruttoeffekt direkt ablesen.
4. Wenn der Bruttoeffekt um mindestens $1,5 \text{ s}^{-1}$ über dem Nulleffekt liegt, ist von einer Kontamination auszugehen, andernfalls nicht. Vor der nächsten Ablesung (weitere Probe oder wieder Nulleffekt) wieder mindestens drei Zeitkonstanten warten.

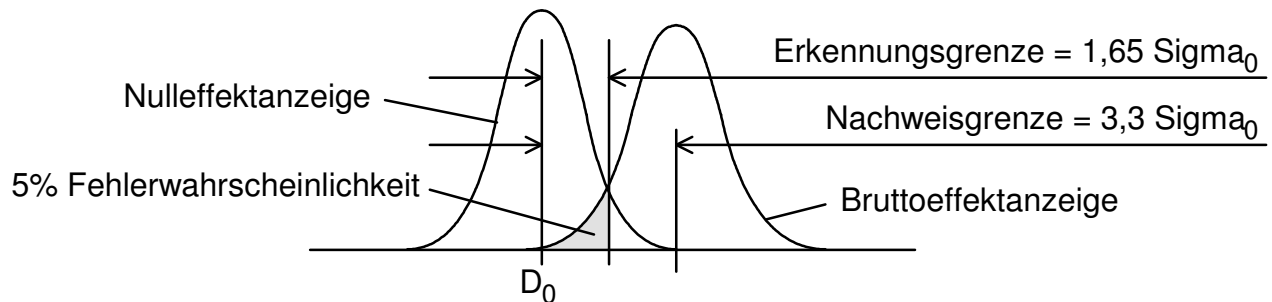
Mit diesem Verfahren wird der Benutzer starke Kontaminationen erkennen, und er wird 5% der sauberen Proben fälschlicherweise als kontaminiert ansehen. Er wird allerdings auch geringe Kontaminationen gelegentlich übersehen. Dieser Problematik widmet sich der nächste Abschnitt im Zusammenhang mit der Nachweisgrenze.

3.4.5 Definition der Nachweisgrenze

Die Erkennungsgrenze entscheidet, ob von einer Kontamination auszugehen ist:

- Ein Messwert oberhalb der Erkennungsgrenze führt zu der Aussage: »Es liegt eine Kontamination vor«. Wie im vorigen Abschnitt erläutert wird diese Aussage fälschlicherweise auch in 5% der Fälle gemacht, bei denen keine Kontamination vorliegt.
- Ein Messwert unterhalb der Erkennungsgrenze führt zu der Aussage: »Es liegt keine Kontamination vor«. Auch diese Aussage wird jedoch keinesfalls immer richtig sein, weil man eine geringe Kontamination übersehen kann. Es stellt sich die Frage, wie groß eine Kontamination mindestens sein muss, damit man sie mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erkennt. Diesen Mindestwert nennt man Nachweisgrenze, auch bekannt als »kleinste nachweisbare Kontamination«.

Die Nachweisgrenze ist also der kleinste Nettoeffekt, der mit einer bestimmten Fehlerwahrscheinlichkeit noch erkannt werden kann. Auch für die Fehlerwahrscheinlichkeit der Nachweisgrenze wird allgemein ein Wert von 5% empfohlen. Dieser Fehler wäre, dass man die Kontamination übersieht. Dieser Fehler tritt immer dann auf, wenn die Anzeige des Bruttoeffekts zufällig so niedrig ist, dass der Messwert unter der Erkennungsgrenze liegt. Die Nachweisgrenze ist also so definiert, dass bei einer Kontamination in Höhe der Nachweisgrenze 5% der Ablesungen des Bruttoeffekts unter der Erkennungsgrenze liegen:



Die Formen der Verteilungskurven von Nulleffekt und Bruttoeffekt sind zwar nicht identisch, aber doch recht ähnlich. Deshalb gilt in guter Näherung: *Bei gleichen Fehlerwahrscheinlichkeiten für Erkennungs- und Nachweisgrenze ist die Nachweisgrenze das Doppelte der Erkennungsgrenze des Nettoeffekts.* Wir können also auf die Formeln (3a) und (3b) für die Erkennungsgrenze zurückgreifen. Dann ist die Nachweisgrenze für den Nettoeffekt (Symbol ρ_n^* gemäß DIN 25482-1):

$$\rho_n^* = 2 R_n^* = 3,3 \text{ Sigma}_0 \quad (D_0 \text{ wird genau gemessen}) \quad (4a)$$

$$\rho_n^* = 2 R_n^* = 4,7 \text{ Sigma}_0 \quad (D_0 \text{ wird direkt abgelesen}) \quad (4b)$$

Die zweite Formel (4b) ergibt eine größere Nachweisgrenze und wird deswegen bevorzugt. Dann ist der Fall abgedeckt, dass im Routinebetrieb D_0 direkt abgelesen wird, was in der Praxis öfter der Fall sein wird.

Auch unter Fachleuten gibt es nicht immer Einigkeit. Man findet auch die Empfehlung, pauschal sechs Sigma_0 als Nachweisgrenze zu verwenden. Einigkeit besteht aber darin, dass sich die Nachweisgrenze aus Sigma_0 ergibt. Es ist nur eine gewisse »Geschmacksfrage«, wie viele Sigma_0 denn die Nachweisgrenze bilden. Wir werden Formel (4b) verwenden, wobei wir allerdings den Vorfaktor von 4,7 auf 5 aufrunden:

$$\text{Nachweisgrenze} = 5 \text{ Sigma}_0 \quad (5)$$

wobei Sigma_0 aus einer der Formel (2b), (2c) oder (2d) berechnet wird. Als Erkennungsgrenze sollte je nach zugestandener Fehlerhäufigkeit ein Wert zwischen $1,65 \text{ Sigma}_0$ und der halben Nachweisgrenze gewählt werden, d.h. die Erkennungsgrenze sollte ein Drittel bis die Hälfte der Nachweisgrenze betragen.

3.5 Vertrauensbereich des Nettoeffektes

In diesem Abschnitt wird besprochen, welches statistische Vertrauen man zu einem gemessenen Nettoeffekt haben kann. Zuvor mache man sich jedoch klar, dass man in der Praxis den Nettoeffekt nicht immer konkret bestimmen muss. Eine praktische Anweisung zur Kontaminationskontrolle kann z.B. lauten:

- Anhand der Erkennungsgrenze ist die Entscheidung zu treffen, ob eine Kontamination vorliegt oder nicht. Wenn nicht, gilt die Probe als nicht kontaminiert, und der Vorgang ist abgeschlossen. Wenn ja, ist die Probe zu dekontaminieren, und danach ist die Entscheidung erneut zu treffen. Der Versuch der Dekontamination ist so oft zu wiederholen, bis die Probe als nicht mehr kontaminiert gilt.

Bei diesem Verfahren wird das Ausmaß der Kontamination, der Nettoeffekt, also gar nicht als Ergebnis einer Messung benötigt. Dieses Verfahren ist dennoch geeignet, die Einhaltung eines Richtwertes nachzuweisen, wenn die Nachweisgrenze des verwendeten Messgerätes nicht größer ist als dieser Richtwert (und die Erkennungsgrenze nicht größer als die halbe Nachweisgrenze gewählt wurde).

Wie ist aber vorzugehen, wenn eine Aussage über das Ausmaß des Nettoeffekts gemacht werden muss, z.B. weil ein Teil der Kontamination fest haftet und nicht entfernt werden konnte? Die Angabe einer einzigen Zahl für den Nettoeffekt ist wenig hilfreich, solange nicht gleichzeitig eine Angabe über den statistischen Ablesefehler hinzugefügt wird. Für den Nettoeffekt sollte man also nicht eine einzige Zahl angeben, sondern einen Bereich, innerhalb dessen der wahre Wert mit einem bestimmten Vertrauensniveau liegt. Dieser Bereich ist der so genannte Vertrauensbereich. Man gibt ihn z.B. in der Form » $x \pm \Delta x$ « an. Die untere Grenze $x - \Delta x$ und die obere Grenze $x + \Delta x$ nennt man Vertrauensgrenzen. Die Angabe eines Vertrauensbereichs ist nur sinnvoll, wenn gleichzeitig das zugehörige Vertrauensniveau angegeben wird. Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, wird meistens ein Vertrauensniveau von 95% entsprechend zwei Sigma empfohlen.

Der Nettoeffekt ist die Differenz aus Bruttoeffekt und Nulleffekt. Bruttoeffekt und Nulleffekt haben jeder für sich einen Vertrauensbereich, der mit der jeweiligen Standardabweichung gemessen wird. Die Standardabweichung σ_0 des Nulleffekts haben wir bereits ausführlich diskutiert; die Standardabweichungen des Bruttoeffekts nennen wir jetzt σ_B . σ_B wird genau wie σ_0 nach den Formeln des Abschnitts 3.4.3 berechnet, wobei für die Anzeige D die Bruttoeffektzählrate einzusetzen ist. Es stellt sich nun die Frage, wie groß denn die Standardabweichung σ_N des Nettoeffekts bei vorgegebenen σ_B und σ_0 sei. Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir wieder etwas Mathematik bemühen, hier das so genannte Fehlerfortpflanzungsgesetz. Dieses Gesetz besagt (in vereinfachter Form):

Wenn x und y unabhängige Messwerte mit den absoluten Fehlern Δx und Δy - d.h. mit den relativen Fehlern $\Delta x/x$ und $\Delta y/y$ - sind, dann ist

- der relative Fehler $\Delta z/z$ des Produktes $z = x \cdot y$ oder des Quotienten $z = x / y$

$$\frac{\Delta z}{z} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (\text{quadratische Addition der relativen Fehler bei Produkt oder Quotient})$$

- der absolute Fehler Δz der Summe $z = x + y$ oder der Differenz $z = x - y$

$$\Delta z = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (\text{quadratische Addition der absoluten Fehler bei Summe oder Differenz})$$

Diese Formeln berücksichtigen nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit, wie sich die statistischen Fehler der Messwerte x und y in den Fehler des Ergebnisses z fortpflanzen. Der wahrscheinlichste Fehler des Ergebnisses ist zwar immer größer als der Fehler jedes einzelnen Messwertes, aber er ist auch nicht gleich der Summe der einzelnen Fehler, weil diese sich auch teilweise kompensieren können. Der Nettoeffekt ist die Differenz von Bruttoeffekt und Nulleffekt, also muss σ_N nach der zweiten Formel berechnet werden:

$$\boxed{\text{Sigma}_N = \sqrt{\text{Sigma}_B^2 + \text{Sigma}_0^2}} \quad (6)$$

Sobald Sigma_N bekannt ist, kann man leicht den Vertrauensbereich des Nettoeffekts für ein bestimmtes Vertrauensniveau angeben. Wenn z.B. das übliche Vertrauensniveau von 95% gefordert ist (zwei Sigma), und man hat einen Nettoeffekt D_N gemessen, so ist der zugehörige Vertrauensbereich des Nettoeffekts $D_N \pm 2 \cdot \text{Sigma}_N$.

Wir wollen die Formel (6) anhand des praktischen Beispiels der Sonde 6150AD-k aus Abschnitt 3.3 überprüfen. Dort waren $\text{Sigma}_0 = 0,62 \text{ s}^{-1}$ und $\text{Sigma}_B = 0,74 \text{ s}^{-1}$. Dann ist nach Formel (6)

$$\text{Sigma}_N = \sqrt{0,74^2 + 0,62^2} \text{ s}^{-1} = \sqrt{0,932} \text{ s}^{-1} = 0,97 \text{ s}^{-1}$$

Dies ist in der Tat genau der gleiche Wert für Sigma_N , der sich auch experimentell aus der Verteilung der Ablesungen des Nettoeffektes ergeben hatte, was die Gültigkeit von Formel (6) bestätigt.

In der Praxis kennt man Sigma_0 und Sigma_B natürlich nicht so genau wie in unserem Beispiel, wo die Sigmas aus sehr vielen Ablesungen gewonnen wurden. Dies ändert aber nichts daran, dass man Sigma_N mit Hilfe von Formel (6) gut bestimmen kann. Nehmen wir z.B. an, wir hätten den Nulleffekt D_0 und den Bruttoeffekt D_B jeweils nur einmal direkt abgelesen. Nehmen wir weiterhin an, D_0 sei 7 s^{-1} gewesen (also zufällig etwas höher als der Mittelwert von $6,1 \text{ s}^{-1}$), und D_B sei $8,5 \text{ s}^{-1}$ gewesen (also zufällig etwas geringer als der Mittelwert von $9,1 \text{ s}^{-1}$). Weitere Informationen haben wir nicht, da wir die »wahren« Werte nicht kennen. Wir haben also einen Nettoeffekt $D_N = (8,5 - 7) \text{ s}^{-1} = 1,5 \text{ s}^{-1}$ abgelesen. Jetzt fehlt noch Sigma_N . Aus der Gebrauchsanweisung des 6150AD lesen wir im Bereich 7 bis $8,5 \text{ s}^{-1}$ ein Sigma-rel von etwa 9% ab. Also gilt $\text{Sigma}_0 = 9\% \cdot 7 \text{ s}^{-1} = 0,63 \text{ s}^{-1}$ und $\text{Sigma}_B = 9\% \cdot 8,5 \text{ s}^{-1} = 0,765 \text{ s}^{-1}$. Demnach ist nach Formel (6): $\text{Sigma}_N = \sqrt{0,765^2 + 0,63^2} \text{ s}^{-1} = 0,99 \text{ s}^{-1}$. Dieser Wert für Sigma_N unterscheidet sich nur ganz geringfügig vom »wahren« Wert von $0,97 \text{ s}^{-1}$. Dies liegt daran, dass Sigma_0 und Sigma_B sich nur wenig mit der Impulsrate ändern. Bei einem Vertrauensniveau von 95% geben wir also als Vertrauensbereich an: $D_N = (1,5 \pm 2) \text{ s}^{-1}$. Diese Angabe ist auch korrekt, da der wahre Wert von $D_N = 3 \text{ s}^{-1}$ innerhalb dieses Bereiches liegt. Allerdings liegt auch $D_N = 0$ innerhalb dieses Bereiches. Bei einem Vertrauensniveau von 95% lässt sich also nicht einmal behaupten, dass überhaupt eine Kontamination vorliege. Dies zeigt, wie wichtig die Angabe eines Vertrauensbereichs für die Aussagekraft eines Messwertes ist.

Sigma_N lässt sich nur verkleinern, indem man die Messdauer erhöht. Die Messdauer eines Ratemeters ist aber durch dessen Zeitkonstante festgelegt; als Anwender hat man kaum die Möglichkeit, die Zeitkonstante zu verändern. Eine sehr große Zeitkonstante hat außerdem den Nachteil, dass das Messgerät für die Praxis zu träge wird. Deswegen hat das 6150AD außer dem Betrieb als Ratemeter auch die Funktion der Anzeige des Mittelwertes. Mit Hilfe dieser Funktion lässt sich der statistische Fehler durch entsprechend lange Messzeiten fast beliebig reduzieren. Das 6150AD5/6 berechnet selbst das Sigma-rel des Mittelwertes, welches mit zunehmender Messdauer immer kleiner wird und sich durch Tastendruck anzeigen lässt^A.

Wir betrachten nochmals das Beispiel der 6150AD-k aus Abschnitt 3.3. Bei der Messung des Nulleffekts zeigte das 6150AD6 nach 4000 Sekunden einen Mittelwert von $6,1 \text{ s}^{-1}$ und ein Sigma-rel von 0,6% an.

^A Das 6150AD1-4 hat diese Funktion noch nicht. Es zeigt zwar den Mittelwert an, nicht jedoch Sigma-rel. Beim 6150AD1-4 gibt es zwei Methoden zur Bestimmung von Sigma oder Sigma-rel:

1. Man begnügt sich mit Sigma-rel = 5%. Hierzu wartet man, bis die Mittelwertanzeige nicht mehr blinkt, und nimmt dann Sigma-rel = 5% an.
2. Man berechnet Sigma oder Sigma-rel nach den Formeln (1a) oder (1b) aus Abschnitt 3.4.1. Die Impulszahl kann man als »Dosis« am 6150AD ablesen (6150AD vor jeder Messung aus- und wieder einschalten, damit die Sondendosis gelöscht wird). Achtung: In die Formeln (1a) und (1b) muss die echte Impulszahl N eingesetzt werden, d.h. es muss berücksichtigt werden, dass die vom 6150AD angezeigte »Dosis« den Umrechnungsfaktor F enthält (»Dosis« = $F \cdot N$). Daher ist die echte Impulszahl $N = \text{Dosis}/F$.

Bei der Messung des Bruttoeffekts zeigte es nach ebenfalls 4000 Sekunden einen Mittelwert von $9,1 \text{ s}^{-1}$ und ein Sigma-rel von $0,5\%$ an. Aus diesen Daten ergibt sich ein wesentlich kleineres Sigma_N als bei der Direktablesung. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse aus Direktablesung und Mittelwert gegenüber gestellt:

	Direktablesung der Impulsratenanzeige des 6150AD (»Sigma-rel« stammt aus der Grafik in der Gebrauchsanweisung des 6150AD)			Mittelwert und Standardabweichung des 6150AD nach einer Messdauer von jeweils 4000 Sekunden (»Sigma-rel« wie vom 6150AD6 angezeigt)		
	Anzeige	Sigma-rel	Sigma	Anzeige	Sigma-rel	Sigma
Nulleffekt	$\approx 6 \text{ s}^{-1}$	$\approx 10 \%$	$\text{Sigma}_0 \approx 0,6 \text{ s}^{-1}$	$6,1 \text{ s}^{-1}$	$0,6 \%$	$\text{Sigma}_0 = 0,037 \text{ s}^{-1}$
Bruttoeffekt	$\approx 9 \text{ s}^{-1}$	$\approx 8 \%$	$\text{Sigma}_B \approx 0,7 \text{ s}^{-1}$	$9,1 \text{ s}^{-1}$	$0,5 \%$	$\text{Sigma}_B = 0,046 \text{ s}^{-1}$
Nettoeffekt	$\approx 3 \text{ s}^{-1}$		$\text{Sigma}_N \approx 1,0 \text{ s}^{-1}$	$3,0 \text{ s}^{-1}$		$\text{Sigma}_N = 0,059 \text{ s}^{-1}$

Mit Hilfe des Mittelwertes haben wir also ein Sigma_N von $0,06 \text{ s}^{-1}$ erreicht. Bei einem Vertrauensniveau von 95% können wir also für den Nettoeffekt einen Vertrauensbereich von $(3,0 \pm 0,12) \text{ s}^{-1}$ angeben. Dies ist eine sehr hohe Genauigkeit von $\pm 4\%$.

Dieses Beispiel zeigt in eindrucksvoller Weise, wie stark die Messdauer in die Genauigkeit eingeht. Es zeigt auch, dass die Anzeige des Mittelwertes durch das 6150AD ein hervorragendes Werkzeug zur Reduzierung des statistischen Fehlers darstellt, wenn für die Messung eine entsprechend lange Zeit zur Verfügung steht.

Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Reduzierung des statistischen Fehlers nur die Ablesegenauigkeit verbessert. Systematische Fehler - wie z.B. die unbekannte Selbstabsorption der Quelle - werden durch eine hohe Ablesegenauigkeit nicht ausgeräumt. Es macht daher wenig Sinn, den Ablesefehler auf wenige Prozent zu drücken, wenn systematische Unsicherheiten von 20% bis 30% oder mehr herrschen.

4. Bedienung

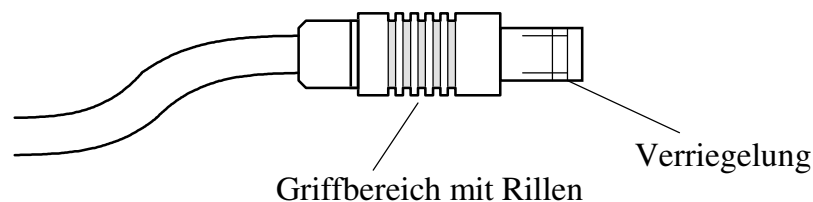
4.1 Anschluss der Sonden an das 6150AD

Im Falle der Sonde 6150AD-k wird zunächst ein Dosisleistungsmesser 6150AD auf die Sonde aufgesetzt und an seiner Stirnseite mit der Rändelschraube arretiert. An der Sonde 6150AD-k ist ein kurzes Sondenkabel fest angebracht. Dieses wird in die Sondenbuchse des 6150AD gesteckt.

Im Falle der Sonden 6150AD-17 und 6150AD-19 ist ein separates Sondenkabel erforderlich (Zubehör). Mit Hilfe dieses Sondenkabels wird die Sonde mit dem Dosisleistungsmesser 6150AD verbunden. Da die Stecker an beiden Enden des Sondenkabels identisch sind, ist es egal, welches Kabelende in die Sonde und welches in das 6150AD gesteckt wird.

Das Sondenkabel dient nicht nur der Datenübertragung, sondern es versorgt die Sonde auch mit Strom. Um eine Sonde außer Betrieb zu nehmen, wird entweder das Sondenkabel abgezogen, oder das 6150AD wird ausgeschaltet. Beim Anstecken oder Abziehen des Kabels darf das 6150AD eingeschaltet sein, es erkennt den Sondenwechsel automatisch.

ACHTUNG! Beim Abziehen des Sondenkabels muss der Sondenstecker im Griffbereich mit den Rillen angefasst werden, um die Verriegelung zu lösen! Versuchen Sie niemals, den Sondenstecker an seinem glatten Ende oder gar am Sondenkabel herauszuziehen! Aufgrund der Verriegelung des Steckers wäre eine Beschädigung des Sondenkabels unvermeidlich!



Das 6150AD zeigt den Sondentyp links oben wie folgt an:

- »ext 17« bei der Sonde 6150AD-17,
- »ext 19« bei der Sonde 6150AD-19,
- »ext 0« bei der Sonde 6150AD-k. Die Sonde 6150AD-k ist ein Mitglied der Sondenfamilie 6150AD-0, deren Impulsrate ohne Umrechnungsfaktor angezeigt wird.

Die Einheit wechselt bei allen Sonden automatisch auf S^{-1} (Impulse pro Sekunde). Alle Messwerte, die das 6150AD jetzt anzeigt, sind mit der Sonde gewonnen (mit Ausnahme der Batteriespannung, diese bezieht sich auf die Batterie des 6150AD). Die Bedeutung der verschiedenen Anzeigen entnehmen Sie bitte der Gebrauchsanweisung des 6150AD.

4.2 6150AD-17

Die Sonde 6150AD-17 hat als Detektor ein Geiger-Müller-Zählrohr mit einem Endfenster aus Glimmer. Dieses Endfenster hat eine Dicke von 1,5 bis 2 mg/cm^2 und sitzt an der runden Stirnfläche der Sonde hinter einem Schutzgitter. Eine abnehmbare Schutzkappe aus Gummi dient als zusätzlicher Schutz des Endfensters. Außerdem kann die Schutzkappe auch zur Diskriminierung (Unterdrückung) von Alpha- und Betastrahlung gegenüber Gammastrahlung benutzt werden.

ACHTUNG! Das Endfenster ist sehr dünn und somit sehr empfindlich. Vermeiden Sie unbedingt jede Berührung des Endfensters, weil eine solche Berührung das Zählrohr zerstören könnte!

Bei der Lagerung der Sonde sollte die Schutzkappe auf jeden Fall aufgesetzt bleiben. Im Betrieb der Sonde hängt es von den Umständen ab, ob die Schutzkappe aufgesetzt sein sollte oder nicht:

- Falls Sie einen Gegenstand auf Oberflächenkontamination untersuchen wollen, müssen Sie die Schutzkappe auf jeden Fall abnehmen, damit die Sonde auch auf Alpha- und Betastrahlung anspricht. Bringen Sie die Stirnfläche mit dem Schutzgitter so dicht wie möglich in die Nähe des zu untersuchenden Gegenstandes. Schalten Sie den akustischen Einzelimpulsnachweis des 6150AD ein, damit Sie einen eventuellen Anstieg der Impulsrate auch akustisch wahrnehmen. Falls Sie einen solchen Anstieg nicht gleich beobachten, berücksichtigen Sie die Zeitkonstante des 6150AD. Diese beträgt 32 Sekunden bei der typischen Nulleffektanzeige von $0,07 \text{ s}^{-1}$. Um kleine Kontaminationen in Höhe der Nachweisgrenze erkennen zu können, müssen Sie drei Zeitkonstanten warten, bevor Sie die Impulsrate ablesen! Falls Sie eine Kontamination beobachten, achten Sie darauf, möglichst keine Kontamination auf die Sonde oder gar auf sich selbst zu übertragen.
- Nur wenn raue Umgebungsbedingungen eine Beschädigung des Endfensters befürchten lassen, sollte ein Betrieb mit aufgesetzter Schutzkappe erwogen werden. Dann ist die Sonde allerdings nur noch auf Photonenstrahlung empfindlich. In dieser Form stellt die Sonde eine »Gamma-Spürsonde« dar, mit deren Hilfe ein Anstieg der Ortsdosisleistung festgestellt werden kann, z.B. um ein gammastrahlendes Präparat zu lokalisieren.

Wenn unter sonst gleichen Bedingungen die Anzeige ohne Schutzkappe deutlich größer ist als mit Schutzkappe, kann hieraus gefolgert werden, dass Alpha- oder Betastrahlung vorhanden ist (oder Photonenstrahlung sehr geringer Energie). Eine weitergehende Information über die Natur der Strahlung, insbesondere um welches Nuklid es sich handelt, steht nicht zur Verfügung. Wenn man den Nettoeffekt in eine Oberflächenkontamination umrechnen will, muss man sowohl das Nuklid als auch dessen Kalibrierfaktor kennen. Abschnitt 6.1 enthält Kalibrierfaktoren für eine Auswahl von Radionukliden.

Zum Betrieb als »Gammasonde« ist Folgendes zu sagen: Wir kalibrieren die Sonde 6150AD-17 bei Cs-137-Gammastrahlung so, dass für Photonenstrahlung (Röntgen- oder Gammastrahlung) gilt:

$$1 \mu\text{Sv/h} = 1 \text{ s}^{-1} \quad (\text{für Photonenstrahlung der Energie 200 bis 1300 keV})^A$$

Diese einfache Umrechnung gilt nur für Photonen-Energien im genannten Bereich, da die Sonde keine Energiekompensation hat. In diesem Energiebereich ist die Sonde recht gut zur Messung einer Photonendosisleistung geeignet. Die Schutzkappe hat bei diesen hohen Energien fast keinen Einfluss auf die Anzeige.

Bei kleineren Photonen-Energien unterhalb 200 keV hängt die Anzeige mit fallender Energie immer mehr von der Einfallrichtung der Strahlung ab, und auch der Einfluss der Schutzkappe wird immer größer. Für so kleine Energien wird eine Umrechnung der Anzeige von s^{-1} in $\mu\text{Sv/h}$ meistens falsche Ergebnisse liefern. Insbesondere wenn die Schutzkappe abgenommen ist und die Photonenstrahlung senkrecht auf das Endfenster einfällt, erhält man deutlich höhere Anzeigen als es mit einer energiekompensierten Sonde der Fall wäre. Dies ist ein durchaus erwünschter Effekt, wenn es darum geht, auch niederenergetische Photonenstrahlung nicht quantitativ zu messen, sondern möglichst effektiv nachweisen zu können.

^A Um dies zu erreichen, multipliziert das 6150AD die vom Zählrohr gelieferte Impulsrate mit einem Faktor von ca. 0,65 (dies ist der Faktor F aus Abschnitt 3.4.3).

4.3 6150AD-k

Die Sonde 6150AD-k hat als Detektor ein Großflächen-Proportionalzählrohr mit einem Fenster aus Aluminiumfolie. Das Zählrohr ist geschlossen und benötigt somit keine Füllung oder Spülung aus externen Gasflaschen, wie Sie dies vielleicht von ähnlichen Geräten anderer Hersteller kennen. Dies vereinfacht die Handhabung erheblich, da die Sonde sofort messbereit ist. Als Füllgas wird ein Edelgasgemisch verwendet, welches nicht brennbar ist und somit auch im Falle von Gasverlust kein Feuer- oder Explosionsrisiko darstellt. Die Aluminiumfolie hat eine Dicke von ca. 2,8 mg/cm² und wird von einem Stützgitter gehalten, über dem ein Feingitter als zusätzlicher Schutz der Folie sitzt.

ACHTUNG! Die Aluminiumfolie ist sehr dünn und somit sehr empfindlich. Vermeiden Sie unbedingt jede Berührung der Aluminiumfolie, weil eine solche Berührung das Zählrohr zerstören könnte!

Ein Blech aus Edelstahl kann zur Diskriminierung (Unterdrückung) von Betastrahlung gegenüber Gammastrahlung benutzt werden. Bei der Lagerung bietet dieses Diskriminatorblech einen zusätzlichen Schutz des Fensters.

Der Haltegriff der Sonde besitzt ein feststellbares Gelenk, sodass die Orientierung der Messfläche der Haltung der Hand angepasst werden kann. Am Haltegriff kann die Griffverlängerung 770.1-60 (optionales Zubehör) angebracht werden, um Messungen am Boden bequem in stehender Position durchführen zu können. Mit Hilfe der Rohrverlängerung 770.1-70 (ebenfalls optionales Zubehör) kann die Griffverlängerung 770.1-60 nochmals verlängert werden (siehe Skizze bei den technischen Daten).

Die Sonde kann auch abgesetzt vom 6150AD betrieben werden. Dies erleichtert die Ablesung des 6150AD wesentlich, wenn mit der Sonde an schwer zugänglichen Stellen gemessen werden soll (z.B. an der Unterseite eines Kraftfahrzeuges). Hierzu hat das Sondengehäuse auf der linken Seite eine Sondenbuchse. Über diese Buchse wird die Sonde dann mit einem normalen Sondenkabel (optionales Zubehör, Länge bis zu 100 m) mit dem 6150AD verbunden. Das an der Sonde fest angebrachte kurze Kabel wird jetzt nicht benötigt; zur Aufbewahrung seines Steckers steht an der Stirnseite der Sonde ein Steckerhalter zur Verfügung.

Die Sonde 6150AD-k kann in zwei Betriebsarten arbeiten: »Alpha« und »Alpha-Beta-Gamma«. Die Wahl der Betriebsart erfolgt über den Schalter auf der Sonde, dessen beide Positionen mit »α« und »αβγ« gekennzeichnet sind. In der Betriebsart »α« wird das Zählrohr mit einer geringeren Hochspannung betrieben und ist deshalb nur für Alphastrahlung empfindlich. In der Betriebsart »αβγ« werden alle drei Strahlungsarten erkannt. Welche Betriebsart eingestellt ist, lässt sich außer an der Stellung des Schalters auch an der Nulleffektanzeige erkennen. Diese beträgt in der Betriebsart »αβγ« ca. 6 s⁻¹, in der Betriebsart »α« nur ca. 0,05 s⁻¹. Dies liegt daran, dass die natürliche Umgebungsstrahlung keinen nennenswerten Anteil an Alphastrahlung enthält (die verbleibende Anzeige von 0,05 s⁻¹ ist nicht etwa durch einen »Rest« an Alphastrahlung verursacht, sondern stellt den unvermeidlichen apparativen Nulleffekt dar).

Wenn man eine Messung durchführt, weiß man im Allgemeinen nicht, welche Strahlungsarten vorhanden sein könnten. Um eine eventuelle Kontamination nicht zu übersehen, muss man dafür sorgen, dass die Sonde auf alle drei Strahlungsarten anspricht. Hierzu muss die Betriebsart »αβγ« eingestellt sein, und das Diskriminatorblech muss abgenommen werden, damit Alpha- und Betastrahlung zum Zählrohr gelangen können.

ACHTUNG! Wenn eine Kontamination unbekannter Natur aufgespürt werden soll, muss das Diskriminatorblech abgenommen sein und die Betriebsart »αβγ« eingestellt sein, da die Sonde nur unter diesen Bedingungen auf alle drei Strahlungsarten anspricht!

Bringen Sie die Unterseite der Sonde mit dem Zählrohrfenster so dicht wie möglich in die Nähe des zu untersuchenden Gegenstandes. Schalten Sie den akustischen Einzelimpulsnachweis des 6150AD ein,

damit Sie einen eventuellen Anstieg der Impulsrate auch akustisch wahrnehmen. Falls Sie einen solchen Anstieg nicht gleich beobachten, berücksichtigen Sie die Zeitkonstante des 6150AD. Die Zeitkonstante hängt von der Impulsrate ab. Sie beträgt acht Sekunden in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « (Nulleffektanzeige typisch 6 s^{-1}) und 32 Sekunden in der Betriebsart » α « (Nulleffektanzeige typisch $0,05\text{ s}^{-1}$). Um kleine Kontaminationen in Höhe der Nachweisgrenze erkennen zu können, müssen Sie drei Zeitkonstanten warten, bevor Sie die Impulsrate ablesen! Falls Sie eine Kontamination beobachten, achten Sie darauf, möglichst keine Kontamination auf die Sonde oder gar auf sich selbst zu übertragen.

Sobald man eine Kontamination erkannt hat, kann man nach folgendem Verfahren Rückschlüsse auf die beteiligten Strahlungsarten ziehen: Schalter auf » α « stellen und den Anteil an Alphastrahlung ablesen. Dann Schalter wieder auf » $\alpha\beta\gamma$ « stellen, Diskriminatorblech aufsetzen und den Gamma-Anteil ablesen. Der Beta-Anteil ergibt sich aus Gesamtanzeige (ohne Diskriminatorblech) minus Alpha-Anteil minus Gamma-Anteil. Bei allen Messungen nicht vergessen, den jeweiligen Nulleffekt abzuziehen (ca. 6 s^{-1} in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «, ca. $0,05\text{ s}^{-1}$ in der Betriebsart » α «)! Ebenfalls nicht vergessen, die Sonde für die nächste Messung wieder auf Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « ohne Diskriminatorblech vorzubereiten!

Eine Identifizierung des verursachenden Nuklids ist nicht möglich. Wenn man den Nettoeffekt in eine Oberflächenkontamination umrechnen will, muss man sowohl das Nuklid als auch dessen Kalibrierfaktor kennen. Abschnitt 6.1 enthält Kalibrierfaktoren für eine Auswahl von Radionukliden.

Hinweis: Wenn das Diskriminatorblech aufgesetzt wird und einrastet, erfährt die Sonde eine kurzfristige Erschütterung, und kann auf diese Erschütterung mit einem kurzzeitigen Anstieg der Impulsrate reagieren. Dieses Verhalten stellt keinen Defekt der Sonde dar.

Wenn man keine Kontamination erkannt hat, kann es sich dennoch lohnen, auf Betriebsart » α « umzuschalten und die Messung zu wiederholen. In der Betriebsart » α « ist wegen des deutlich geringeren Nulleffekts die Nachweisgrenze deutlich geringer. Mit anderen Worten, die Sonde kann Alphastrahlung in der Betriebsart » α « deutlich besser nachweisen als in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «. Beispiel: Es liege eine Kontamination mit Alphastrahlern vor, die eine Anzeige von ca. $0,5\text{ s}^{-1}$ bewirkt. In der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « bei einem Nulleffekt von 6 s^{-1} wird ein Anstieg um $0,5\text{ s}^{-1}$ sicherlich übersehen, nicht jedoch in der Betriebsart » α « bei einem Nulleffekt von nur $0,05\text{ s}^{-1}$. Da Alphastrahler gefährlicher sind als Beta- oder Gammastrahler gleicher Aktivität, sind Richtwerte für die maximal zulässige Oberflächenkontamination für Alphastrahler geringer. Möglicherweise ist die Nachweisgrenze der Sonde 6150AD-k nur in der Betriebsart » α « klein genug, um die Einhaltung eines Richtwertes für Alphastrahler nachzuweisen. Dann ist eine zweite Messung in der Betriebsart » α « sogar zwingend erforderlich.

ACHTUNG! Für Alphastrahler ist die Nachweisgrenze in der Betriebsart » α « deutlich geringer (besser) als in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «! Wenn eine Kontamination mit Alphastrahlern nicht ausgeschlossen werden kann, wird dringend empfohlen, eine zweite Messung in der Betriebsart » α « durchzuführen, auch wenn bei der ersten Messung in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « keine Kontamination erkannt wurde!

Die Sonde 6150AD-k lässt sich in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « auch als empfindliche Spürsonde für Photonenstrahlung (Röntgen- oder Gammastrahlung) verwenden. Die Empfindlichkeit beträgt etwa:

$$1\ \mu\text{Sv/h} \approx 50\ \text{s}^{-1} \quad (\text{für Photonenstrahlung der Energie 200 bis 1300 keV})$$

Diese Umrechnung gilt nur für Photonen-Energien im genannten Bereich. Der Einfluss des Diskriminatorblechs ist in diesem Energiebereich nur gering. Bei kleineren Photonen-Energien, etwa im Bereich von 30 bis 200 keV, und ohne Diskriminatorblech, ist die Sonde sogar noch deutlich empfindlicher. Dies ist ein durchaus erwünschter Effekt, wenn es darum geht, auch niederenergetische Photonenstrahlung nicht quantitativ zu messen, sondern möglichst effektiv nachweisen zu können.

4.4 6150AD-19

Die Sonde 6150AD-19 hat als Detektor ein Geiger-Müller-Zählrohr, welches in einen Becher aus Glas integriert ist. Da Glas bekanntlich leicht bricht, muss die Sonde mit gewisser Vorsicht behandelt werden, obwohl sie nicht so empfindlich ist wie das Endfenster eines Zählrohres. Eine abschraubbare Schutzhaube aus Kunststoff dient als Schutz des Becherzählrohres bei der Lagerung. Außerdem wird die Schutzhaube während einer Messung als Lichtschutz benötigt.

ACHTUNG! Das Becherzählrohr kann in gewissem Umfang auf Licht reagieren. Während einer Messung muss die Schutzhaube immer aufgeschraubt sein, weil sonst Licht die Anzeige erhöhen und somit das Messergebnis verfälschen könnte!

Das Becherzählrohr hat eine Markierung für eine Füllmenge vom 100 ml (100 Milliliter, 100 cm³). Bei einer Messung muss es immer mit genau 100 ml gefüllt werden, weil nur dann die Kalibrierfaktoren aus Abschnitt 6.2 gelten. Wenn die zu messende Probe weniger als 100 ml umfasst, muss sie auf eine Gesamtmenge von 100 ml verdünnt werden, wenn die Kalibrierfaktoren zur Anwendung kommen sollen.

Wir gehen im Folgenden davon aus, dass die Sonde immer mit einer Flüssigkeit gefüllt wird, die im Wesentlichen aus Wasser besteht (auch Getränke wie Milch oder Fruchtsäfte bestehen im Wesentlichen aus Wasser). Dies ist insofern nicht ganz unwichtig, weil die Selbstabsorption in der Flüssigkeit in die Anzeige und somit auch in den Kalibrierfaktor eingeht. Wenn die Flüssigkeit eine deutlich andere Dichte hat als Wasser, ändert sich auch die Selbstabsorption und damit der Kalibrierfaktor. Falls Sie eine solche andere Flüssigkeit quantitativ untersuchen wollen, bleibt Ihnen nicht erspart, sich eine radioaktive Referenzlösung zu beschaffen und den Kalibrierfaktor selbst zu bestimmen.

Die Messung des Nulleffekts verlangt genauere Betrachtung. Im Nulleffekt ist die Umgebungsstrahlung enthalten. Wenn das Zählrohr gefüllt ist, schirmt die Füllung die Umgebungsstrahlung teilweise ab. Deswegen muss das Zählrohr auch bei Messung des Nulleffekts gefüllt sein.

ACHTUNG! Bei der Messung des Nulleffekts muss das Becherzählrohr mit 100 ml sauberen Wassers gefüllt sein, um die Umgebungsstrahlung in der gleichen Weise abzuschirmen wie dies danach bei der Messung des Bruttoeffekts der Fall ist!

Die Sonde hat eine relative geringe Empfindlichkeit. Die Gründe hierfür wurden in Abschnitt 2.4 erläutert. Wir empfehlen daher, zwecks genauerer Ablesung die Mittelwertanzeige des 6150AD zu benutzen, und zwar sowohl bei der Messung des Nulleffekts als auch bei der Messung des Bruttoeffekts. Dies benötigt zwar mehr Zeit, bringt aber deutlich genauere Ergebnisse. Da die Untersuchung einer Flüssigkeit keine alltägliche Aktion ist, sondern meistens unter Laborbedingungen durchgeführt wird, sollte diese Zeit auch zur Verfügung stehen. Weiterhin empfehlen wir, den Vertrauensbereich des Nettoeffekts gemäß Abschnitt 3.5 zu berechnen, um zu erkennen, ob ein eventuell festgestellter Nettoeffekt überhaupt signifikant von Null verschieden ist.

Abschließend noch ein Hinweis zur Kalibrierung der Sonde 6150AD-19. Wir kalibrieren die Sonde nicht mit radioaktiven Referenzlösungen, weil wir unseren Mitarbeitern den Umgang mit solchen Lösungen nicht zumuten können und wollen. Statt dessen kalibrieren wir die Sonde mit Cs-137-Gammastrahlung frei in Luft so, dass gilt:

$$1 \mu\text{Sv/h} = 5 \text{ s}^{-1} \text{ (für Cs-137-Gammastrahlung)}^{\text{A}}$$

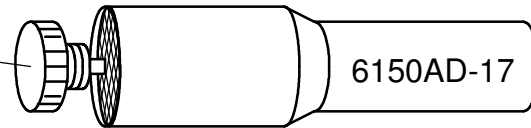
Dies soll aber nicht bedeuten, dass wir die Sonde auch als Gammasonde empfehlen. Es soll nur den Inhalt des Kalibrierprotokolls der Sonde erklären. Im Kalibrierprotokoll geben wir die Anzeige bei verschiedenen Cs-137-Dosisleistungen an, und dort ist der Sollwert für die Anzeige (in s⁻¹) gleich dem Fünffachen des Istwertes (in μSv/h).

^A Um dies zu erreichen, multipliziert das 6150AD die vom Zählrohr gelieferte Impulsrate mit einem Faktor von ca. 0,8 (dies ist der Faktor F aus Abschnitt 3.4.3).

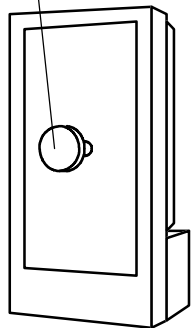
5. Radioaktive Kontrollmessungen

Zunächst soll die radiologische Funktionskontrolle mit Hilfe des Prüfstrahlers 6706 (Nennaktivität 333 kBq Cs-137) beschrieben werden. Dieser Prüfstrahler ist als Gammastrahler^A eigentlich kein idealer Kandidat für Kontaminationsmessgeräte. Manche Benutzer mögen aber bereits aus anderen Gründen einen Prüfstrahler 6706 oder einen gleichwertigen Prüfstrahler in der Ausführung nach DIN 44427 besitzen. Solchen Benutzern sei kurz gezeigt, wie sie die Geräte mit dem Strahler 6706 überprüfen können:

Prüfstrahler 6706 auf Schutzgitter
Anzeige ca. 250 s⁻¹



Prüfstrahler 6706 auf Schutzgitter
Anzeige ca. 950 s⁻¹



6150AD-k
Modus »Alpha-Beta-Gamma«
ohne Diskriminatorblech

Prüfstrahler 6706 auf Schutzhaube
Anzeige ca. 45 s⁻¹



6150AD-19

Der angezeigte Wert muss noch auf den Aktivitätsverlust des Strahlers korrigiert werden. Diese Korrektur ist in der Gebrauchsanweisung des 6150AD beschrieben.

ACHTUNG! Die angegebenen Anzeigewerte sind nur Richtwerte, die von Exemplar zu Exemplar etwas variieren können und außerdem mit der Unsicherheit der Aktivität des Prüfstrahlers behaftet sind. Sie dienen daher nur zur Orientierung für die Funktionsprüfung und sind nicht für eine Kalibrierung der Sonden geeignet!

Wenn kein Prüfstrahler zur Verfügung steht, stellt auch die Anzeige bei natürlicher Umgebungsstrahlung ein recht brauchbares Kriterium für die Funktionstüchtigkeit der Sonde dar. In den technischen Daten finden Sie typische Werte für die Anzeige bei Umgebungsstrahlung.

Geiger-Müller-Zählrohre - wie in den Sonden 6150AD-17 und 6150AD-19 verwendet - haben im Allgemeinen eine sehr gute Langzeitstabilität. Das 6150AD verarbeitet die Impulse in rein digitaler Form. Daher gilt nach unseren Erfahrungen für ein Geiger-Müller-Zählrohr in den allermeisten Fällen: Entweder das Zählrohr arbeitet richtig, oder es arbeitet gar nicht, z.B. wenn es gebrochen ist und Null anzeigt. Wenn die Sonden 6150AD-17 und 6150AD-19 bei Umgebungsstrahlung vernünftige Werte anzeigen, gibt es daher eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Sonden in Ordnung sind.

Für die Sonde 6150AD-k mit ihrem Proportionalzählrohr gilt dies nicht in dieser ausgeprägten Form. Hier kann es vorkommen, dass ein winziges Leck zu einem langsamen Verlust von Zählgas und somit zu

^A Cs-137 ist ein Betastrahler mit einer maximalen Beta-Energie von 0,51 MeV. Nach diesem Beta-Zerfall wird aus dem Cs-137 Atomkern ein Ba-137m Atomkern, welcher unter Aussendung eines Photons der Energie 662 keV sofort in seinen Grundzustand übergeht. Cs-137 sendet also sowohl Beta- wie Gammastrahlung aus. Wenn das Cs-137 Präparat so beschaffen ist, dass die Betastrahlung absorbiert wird, dringt nur die Gammastrahlung nach außen. Dies gilt für den Prüfstrahler 6706. Auch Co-60 sendet sowohl Beta- wie Gammastrahlung aus.

einem langsamen Verlust an Empfindlichkeit führen kann. Dieser Verlust wirkt sich zwar auch bei Umgebungsstrahlung aus, kann dort aber leichter übersehen werden. Daher ist bei der Sonde 6150AD-k eine radiologische Überprüfung mit Prüfstrahler wichtiger als bei den Sonden 6150AD-17 und 6150AD-19. Zur radiologischen Überprüfung speziell der Sonde 6150AD-k gibt es den Prüfstrahler 6708, der Alpha- und Betastrahlung aussendet. Angaben zum Prüfstrahler 6708 finden Sie unter den technischen Daten der Sonde 6150AD-k bei deren Zubehör, detaillierte Angaben finden sich im separaten Datenblatt des 6708.

Obwohl für die Sonde 6150AD-k konzipiert, lässt sich der Prüfstrahler 6708 auch für die Sonde 6150AD-17 verwenden. Wenn man die Sonde 6150AD-17 ohne Schutzkappe direkt auf den Prüfstrahler 6708 aufsetzt, ergibt sich eine Anzeige von ca. 300 s^{-1} .

6. Zahlenangaben für Kalibrierfaktoren

6.1 6150AD-17 und 6150AD-k

Die in diesem Abschnitt angegebenen Kalibrierfaktoren und Wirkungsgrade dienen folgenden Zwecken:

1. Wirkungsgrad $\epsilon_{4\pi}$: Umrechnung der Nettoeffektzählrate n in die Aktivität A unterhalb der Detektorfläche W :

$$A [\text{Bq}] = n / \epsilon_{4\pi} \quad (n \text{ in } \text{s}^{-1} \text{ und } \epsilon_{4\pi} \text{ in } \text{s}^{-1}/\text{Bq})$$

2. Kalibrierfaktor C_S : Umrechnung der Nettoeffektzählrate n in die flächenbezogene Aktivität A_S gemittelt über die Detektorfläche W :

$$A_S [\text{Bq}/\text{cm}^2] = C_S \cdot n \quad (n \text{ in } \text{s}^{-1} \text{ und } C_S \text{ in } (\text{Bq}/\text{cm}^2)/\text{s}^{-1})$$

Hierbei ist $\epsilon_{4\pi}$ als 4π -Wirkungsgrad gemäß Abschnitt 2.3 definiert. Die beiden Parameter $\epsilon_{4\pi}$ und C_S sind nicht unabhängig voneinander. Wegen $A_S = A / W$ gilt $C_S = 1 / (\epsilon_{4\pi} \cdot W)$. Aus Gründen der Bequemlichkeit werden wir dennoch beide Parameter C_S und $\epsilon_{4\pi}$ angeben.

Die obige Bemerkung, A_S sei die flächenbezogene Aktivität »gemittelt über die Detektorfläche«, soll daran erinnern, dass das Messgerät immer nur diesen Mittelwert erfassen kann, auch wenn die Aktivität nicht gleichmäßig unter der Detektorfläche verteilt ist oder sogar in einem Punkt konzentriert ist.

Die weiter unten in Tabellen angegebenen Kalibrierfaktoren und Wirkungsgrade wurden mit Referenzstrahlern bestimmt, deren Fläche mindestens so groß wie die Detektorfläche war. Damit sind in diesen Faktoren Zählverluste am Rand des Detektors bereits berücksichtigt. Für kontaminierte Flächen deutlich unterhalb der Detektorfläche (punktförmige Kontaminationen) entfallen die Zählverluste am Rand, die Anzeige ist dann etwas höher, die Kontamination wird etwas überschätzt.

Mit »U-nat« ist natürliches Uran gemeint, welches zu 99,3% aus U-238 besteht. Zur Anzeige des Gerätes tragen alle Isotope des Urans sowie deren Tochternuklide bei. Wenn man mit den Daten aus den Tabellen eine Aktivität berechnet, so ist dies nur diejenige von U-238.

Die relativ hohe Empfindlichkeit für Sr-90/Y-90 kommt von der Tatsache, dass Sr-90 mit seiner Tochter Y-90 im Gleichgewicht steht, und daher pro Becquerel Sr-90 zwei Beta-Teilchen pro Sekunde ausgesandt werden, nämlich eines von Sr-90 und eines von Y-90. Wenn man mit den Daten aus den Tabellen eine Aktivität berechnet, so ist dies nur diejenige von Sr-90; die Gesamtaktivität von Sr-90 und Y-90 zusammen ist genau das Doppelte des berechneten Sr-90-Wertes.

ACHTUNG! Die Anwendung eines Kalibrierfaktors setzt voraus, dass man das verursachende Nuklid kennt. Eine Nuklidbestimmung ist mit den Sonden 6150AD-17 und 6150AD-k nicht möglich!

6150AD-17

Alpha- und Beta-Messungen erfolgten ohne die Schutzkappe der Sonde, bei Gamma-Messungen war die Schutzkappe zur Unterdrückung von Alpha- und Betastrahlung aufgesetzt. Der Abstand der Sonde zum Referenzstrahler war in allen Fällen 2 mm.

Kalibrierfaktoren C_S und Wirkungsgrade $\epsilon_{4\pi}$ für die Sonde 6150AD-17 (Detektorfläche $W = 6,2 \text{ cm}^2$)					
Nuklid	$T_{1/2}$ Jahre	überwiegende Strahlungsart und -Energie	$C_S = 1/(\epsilon_{4\pi} \cdot W)$ (Bq/cm ²)/s ⁻¹	$\epsilon_{4\pi}$ s ⁻¹ /Bq	mit Schutz- kappe ja/nein
Am-241	432	Alpha 5,5 MeV	1,3	0,125	nein
U-nat (-238)	(4,5 10 ⁹)	Alpha 4,2 - 4,8 MeV + andere	0,4	0,40	nein
C-14	5730	Beta max. 0,15 MeV	2,5	0,065	nein
Co-60	5,27	Beta max. 0,32 MeV	1,6	0,10	nein
Cs-137	30,2	Beta max. 0,51 MeV	0,7	0,23	nein
Cl-36	300 000	Beta max. 0,71 MeV	0,7	0,23	nein
Sr-90(/Y-90)	28,7	Beta max. 0,54/2,3 MeV	0,3	0,54	nein
Co-60	5,27	Gamma 1,25 MeV	20	0,008	ja
Cs-137	30,2	Gamma 0,66 MeV	120	0,0013	ja

Beispiel zur Anwendung der Tabelle:

Mit einer Sonde 6150AD-17 wurde ein Bruttoeffekt von ca. 8 s^{-1} direkt abgelesen (also nicht über die Mittelwertanzeige des 6150AD). Der Nulleffekt betrug ca. $0,1 \text{ s}^{-1}$, kann also im Rahmen der Ablesegenauigkeit vernachlässigt werden. Der Nettoeffekt beträgt somit ebenfalls 8 s^{-1} .

Aus der Grafik im Kapitel »Zeitkonstante und Standardabweichung« des 6150AD liest man für die Sonde 6150AD-17 ab: Bei einer Anzeige von 8 s^{-1} ist Sigma-rel = 7%.

Weiterhin werde angenommen, dass es sich beim verursachenden Nuklid um Am-241 handelt.

- Frage: Wie groß ist die Oberflächenkontamination gemittelt über die Sondenfläche von $6,2 \text{ cm}^2$?
Antwort: $8 \text{ s}^{-1} \cdot 1,3 \text{ (Bq/cm}^2\text{)/s}^{-1} = 10,4 \text{ Bq/cm}^2$
Genauere Frage: Wie groß ist der Vertrauensbereich bei einem Vertrauensniveau von 95%?
Antwort: Zwei Sigma, also $10,4 \text{ Bq/cm}^2 \pm 2 \cdot 7\% = 10,4 \text{ Bq/cm}^2 \pm 14\%$
- Frage: Wie groß ist die Aktivität unter der Sondenfläche?
Antwort: $8 \text{ s}^{-1} / 0,125 \text{ s}^{-1}\text{/Bq} = 64 \text{ Bq}$
Genauere Frage: Wie groß ist der Vertrauensbereich bei einem Vertrauensniveau von 95%?
Antwort: Zwei Sigma, also $64 \text{ Bq} \pm 14\%$

ACHTUNG! Der genannte Vertrauensbereich bezieht sich nur auf statistische Ablesefehler, nicht auf systematische Unsicherheiten!

Dieses Beispiel war besonders einfach, weil der Nulleffekt im Vergleich zum Bruttoeffekt vernachlässigbar klein war. Wenn dies nicht der Fall ist, gestaltet sich die Berechnung des Vertrauensbereiches etwas mühsamer, weil auch das Sigma des Nulleffekts berücksichtigt werden muss; siehe hierzu das Beispiel zur 6150AD-k auf der nächsten Seite.

6150AD-k

Alpha- und Beta-Messungen erfolgten ohne das Diskriminatorblech, bei Gamma-Messungen war das Diskriminatorblech zur Unterdrückung von Alpha- und Betastrahlung aufgesetzt. Der Abstand der Sonde zum Referenzstrahler war so gering wie es die Konstruktion der Referenzstrahler erlaubte.

Kalibrierfaktoren C_s und Wirkungsgrade $\epsilon_{4\pi}$ für die Sonde 6150AD-k (Detektorfläche $W = 170 \text{ cm}^2$)					
Nuklid	überwiegende Strahlungsart und deren Energie	Betriebsart	$C_s = 1/(\epsilon_{4\pi} \cdot W)$ (Bq/cm ²)/s ⁻¹	$\epsilon_{4\pi}$ s ⁻¹ /Bq	Abstand Sonde zu kontam. Fläche
Am-241	Alpha 5,5 MeV	»α«	0,074	0,08	3,4 mm Luft
		»αβγ«	0,056	0,105	
U-nat (-238)	Alpha 4,2 - 4,8 MeV + andere	»α«	0,21	0,028	1,5 mm Luft
		»αβγ«	0,015	0,40	
C-14	Beta max. 0,15 MeV	»αβγ«	0,182	0,032	12 mm Luft
Co-60	Beta max. 0,32 MeV		0,058	0,10	
Cs-137	Beta max. 0,51 MeV		0,026	0,23	
Cl-36	Beta max. 0,71 MeV		0,026	0,23	
Sr-90(/Y-90)	Beta max. 0,54/2,3 MeV		0,011	0,54	
Co-60	Gamma 1,25 MeV		0,51	0,0115	
Cs-137	Gamma 0,66 MeV	2,69	0,0022		

Beispiel zur Anwendung der Tabelle:

Mit einer Sonde 6150AD-k im Modus »αβγ« wurden folgende Werte direkt abgelesen (also nicht über die Mittelwertanzeige des 6150AD): Nulleffekt 6 s^{-1} , Bruttoeffekt 20 s^{-1} . Also beträgt der Nettoeffekt 14 s^{-1} .

Aus der Grafik im Kapitel »Zeitkonstante und Standardabweichung« des 6150AD liest man für die Sondenfamilie 6150AD-0 ab: Bei 6 s^{-1} ist Sigma-rel = 10%, und bei 20 s^{-1} ist Sigma-rel = 5,5%. Also beträgt das Sigma des Nulleffekts $10\% \cdot 6 \text{ s}^{-1} = 0,6 \text{ s}^{-1}$, und das Sigma des Bruttoeffekts beträgt $5,5\% \cdot 20 \text{ s}^{-1} = 1,1 \text{ s}^{-1}$. Damit beträgt nach Formel (6) aus Abschnitt 3.5 das Sigma des Nettoeffekts:

$$\sqrt{0,6^2 + 1,1^2} \text{ s}^{-1} = 1,25 \text{ s}^{-1}.$$

Weiterhin werde angenommen, dass es sich beim verursachenden Nuklid um Sr-90/Y-90 handelt.

- Frage: Wie groß ist der Vertrauensbereich des Nettoeffekts bei einem Vertrauensniveau von 95%?
Antwort: Zwei Sigma, also $(14 \pm 2 \cdot 1,25) \text{ s}^{-1} = (14 \pm 2,5) \text{ s}^{-1} = 14 \text{ s}^{-1} \pm 18\%$
- Frage: Wie groß ist die Oberflächenkontamination gemittelt über die Sondenfläche von 170 cm^2 ?
Antwort: $14 \text{ s}^{-1} \cdot 0,011 \text{ (Bq/cm}^2\text{)/s}^{-1} = 0,154 \text{ Bq/cm}^2$ (nur Sr-90, ohne Y-90!)
Genauere Frage: Wie groß ist der Vertrauensbereich bei einem Vertrauensniveau von 95%?
Antwort: Zwei Sigma, also $0,154 \text{ Bq/cm}^2 \pm 18\%$
- Frage: Wie groß ist die Aktivität unter der Sondenfläche?
Antwort: $14 \text{ s}^{-1} / 0,54 \text{ s}^{-1}/\text{Bq} = 25,9 \text{ Bq}$ (nur Sr-90, ohne Y-90!)
Genauere Frage: Wie groß ist der Vertrauensbereich bei einem Vertrauensniveau von 95%?
Antwort: Zwei Sigma, also $25,9 \text{ Bq} \pm 18\%$

ACHTUNG! Der genannte Vertrauensbereich bezieht sich nur auf statistische Ablesefehler, nicht auf systematische Unsicherheiten!

Kalibrierfaktoren für andere Radionuklide

Natürlich gibt es noch sehr viel mehr Radionuklide als in den Tabellen mit den Kalibrierfaktoren aufgeführt sind. Man weiß aus praktischer Erfahrung, dass sich für bestimmte Typen von Messgeräten die Kalibrierfaktoren bestimmter Radionuklide ähneln. In den nachfolgenden Tabellen sind verschiedene Nuklide aufgeführt, deren Kalibrierfaktoren in der Nähe der Vergleichsnuklide Am-241, C-14, Co-60 und Cs-137 liegen. Mit Hilfe dieser Tabellen lassen sich Kalibrierfaktoren für andere Nuklide abschätzen.

Diese Werte wurden der Literatur entnommen. »Ähnliche« Kalibrierfaktoren weichen um bis zu ca. 10% von demjenigen des Vergleichsnuklids ab. »Etwas größere« bzw. »etwas kleinere« Kalibrierfaktoren weichen um ca. 10% bis 20% von demjenigen des Vergleichsnuklids ab.

Oberflächenkontaminations-Kalibrierfaktoren für Alpha-Strahler			
Vergleichs-Nuklid	Kalibrierfaktor C_s		
	C_s etwas größer (d.h. etwas schlechter nachweisbar)	C_s ähnlich (d.h. gleich gut nachweisbar)	C_s etwas kleiner (d.h. etwas besser nachweisbar)
Am-241		Th-228, Pu-238	Ra-224, Pu-236

Oberflächenkontaminations-Kalibrierfaktoren für Beta-Strahler			
Vergleichs-Nuklid	Kalibrierfaktor C_s		
	C_s etwas größer (d.h. etwas schlechter nachweisbar)	C_s ähnlich (d.h. gleich gut nachweisbar)	C_s etwas kleiner (d.h. etwas besser nachweisbar)
C-14	Nb-95	S-35, Se-79, Ag-110m, Np-236	Ru-103, I-126, Pm-147, Eu-152
Co-60	P-33, Ca-45, Cu-64, Sb-125	Zr-95, Tc-99, Ce-144, Er-169	Cs-134
Cs-137, Cl-36		F-18, Na-22, P-32, Kr-85, Sr-89, Nb-94, Mo-99, Ag-111, Sb-124, Sb-127, I-131, Ce-141, Eu-154, Re-186, Re-188, Tl-204, Bi-210	

Für Photonenstrahlung ist der Wirkungsgrad der Sonden 6150AD-17 und 6150AD-k nur gering (1% und weniger, siehe die Werte für die Gammastrahlung von Co-60 und Cs-137 auf den vorigen Seiten). Deshalb sind Nuklide, die nur Photonenstrahlung aussenden, schwerer nachzuweisen. Beispiele für reine Photonenstrahler sind:

- Cr-51 (Photonenstrahlung der Energie 320 keV)^A,
- Tc-99m (Photonenstrahlung der Energie 143 keV)^A,
- I-125 (Photonenstrahlung der Energie 35 keV),
- Fe-55 (Photonenstrahlung der Energie 5,9 keV).

Für diese Nuklide können wir mangels geeigneter Referenzstrahler keine Kalibrierfaktoren angeben. Es sei nur darauf hingewiesen, dass es auch zum Nachweis von Photonenstrahlern erforderlich sein kann, die Schutzkappe der Sonde 6150AD-17 bzw. das Diskriminatorblech der Sonde 6150AD-k abzunehmen. Insbesondere die Photonenstrahlung von Fe-55 hat eine so geringe Energie, dass sie bereits von den dünnen Fenstern der Sonden teilweise absorbiert wird.

^A Die Energie der Strahlung von Cr-51 und Tc-99m ist hoch genug um im Energiebereich des 6150AD zu liegen. Damit lässt sie sich prinzipiell als Dosisleistung mit dem 6150AD selbst (ohne Kontaminationsnachweissonde) messen. Dies ändert allerdings nichts an der relativ geringen Empfindlichkeit für Photonenstrahlung, die beim Innenzählrohr des 6150AD wegen dessen Energiekompensation sogar noch ausgeprägter ist als bei den Kontaminationsnachweissonden. Es erfordert eine relativ hohe Aktivität der Quelle (ca. 1 kBq oder mehr), wenn die Dosisleistung selbst in geringem Abstand zur Quelle nicht unmessbar klein sein soll.

6.2 6150AD-19

Die in diesem Abschnitt angegebenen Kalibrierfaktoren und Wirkungsgrade dienen folgenden Zwecken:

1. Wirkungsgrad ϵ : Umrechnung der Nettoeffektzählrate n in die Aktivität A im Messvolumen V :

$$A \text{ [Bq]} = n / \epsilon \quad (n \text{ in } s^{-1} \text{ und } \epsilon \text{ in } s^{-1}/\text{Bq})$$

2. Kalibrierfaktor C_V : Umrechnung der Nettoeffektzählrate n in die volumenbezogene Aktivität A_V :

$$A_V \text{ [Bq/l]} = C_V \cdot n \quad (n \text{ in } s^{-1} \text{ und } C_V \text{ in } (\text{Bq/l})/s^{-1})$$

Hierbei steht »Bq/l« für »Becquerel pro Liter«. Die beiden Parameter ϵ und C_V sind nicht unabhängig voneinander. Wegen $A_V = A / V$ gilt $C_V = 1 / (\epsilon \cdot V)$. Für die Sonde 6150AD-19 gilt $V = 100 \text{ ml} = 0,1 \text{ l}$. Somit ist $C_V = 10 / \epsilon$. Aus Gründen der Bequemlichkeit werden wir dennoch beide Parameter C_V und ϵ angeben.

Die unten in der Tabelle angegebenen Kalibrierfaktoren und Wirkungsgrade wurden mit wässrigen Standardlösungen bestimmt, deren A_V bei 100 bis 200 kBq/l lag. In allen Fällen wurde die Sonde bis zum Markierungsstrich entsprechend 100 ml gefüllt, sodass die gesamte Aktivität in der Sonde bei 10 bis 20 kBq lag. Entsprechend den Hinweisen in Abschnitt 4.4 war bei der Messung des Nulleffekts die Sonde mit 100 ml sauberen Wassers gefüllt. Bei allen Messungen war die Schutzkappe aufgeschraubt.

Der Wirkungsgrad ϵ ist ziemlich gering. Der Grund hierfür wurde in Abschnitt 2.4 ausführlich erläutert. Nur für Sr-90 wird ein Wirkungsgrad von etwas über einem Prozent erreicht. Dies kommt von der Tatsache, dass Sr-90 mit seiner Tochter Y-90 im Gleichgewicht steht, und daher pro Becquerel Sr-90 zwei Beta-Teilchen pro Sekunde ausgesandt werden, nämlich eines von Sr-90 und eines von Y-90. Außerdem ist die Betastrahlung von Y-90 wegen ihrer hohen Energie relativ gut nachweisbar. Wenn man mit den Daten aus der Tabelle eine Aktivität berechnet, so ist dies nur diejenige von Sr-90; die Gesamtaktivität von Sr-90 und Y-90 zusammen ist genau das Doppelte des berechneten Sr-90-Wertes.

ACHTUNG! Die Anwendung eines Kalibrierfaktors setzt voraus, dass man das verursachende Nuklid kennt. Eine Nuklidbestimmung ist mit der Sonde 6150AD-19 nicht möglich!

Kalibrierfaktoren C_V und Wirkungsgrade ϵ für die Sonde 6150AD-19 (Volumen $V = 0,1 \text{ l}$)				
Nuklid	überwiegende Strahlungsarten und -Energien		$C_V = 10/\epsilon$ (Bq/l)/s ⁻¹	ϵ s ⁻¹ /Bq
	Beta	Gamma		
Cs-137	max. 0,51 MeV	0,66 MeV	7000	0,00143
I-131	max. 0,61 MeV	0,36 MeV	12500	0,00080
Sr-90(/Y-90)	max. 0,54/2,3 MeV	-	750	0,01333

Beispiel zur Anwendung der Tabelle:

Mit einer Sonde 6150AD-19 wurde ein Nettoeffekt von 4 s^{-1} mit einem Sigma-rel von 11% gemessen (das Beispiel für die Sonde 6150AD-k auf der vorigen Seite zeigt, wie man Sigma-rel bestimmt).

Weiterhin werde angenommen, dass es sich beim verursachenden Nuklid um Sr-90/Y-90 handelt.

- Frage: Wie groß ist die volumenbezogene Aktivität bei einem Vertrauensniveau von 95%?
Antwort: $4 \text{ s}^{-1} \cdot 750 \text{ (Bq/l)/s}^{-1} \pm 2 \cdot 11\% = 3000 \text{ Bq/l} \pm 22\%$
(nur Sr-90, ohne Y-90; die volumenbezogene Aktivität von Y-90 beträgt ebenfalls 3000 Bq/l!)

ACHTUNG! Der genannte Vertrauensbereich bezieht sich nur auf statistische Ablesefehler, nicht auf systematische Unsicherheiten!

7. Zahlenangaben für Nachweisgrenzen

Die Nachweisgrenze ergibt sich aus der Standardabweichung des Nulleffekts, Sigma_0 . Mit der Formel (5) aus Abschnitt 3.4.5 und der Formel (2b) aus Abschnitt 3.4.3 definieren wir die Nachweisgrenze NG als das Fünffache von Sigma_0^A :

$$NG = 5 \times \text{Sigma}_0 = 5 \times \sqrt{\frac{F \times D_0}{2\tau}} \quad (\text{Nulleffekt } D_0 \text{ am 6150AD direkt abgelesen})$$

oder, wenn man den Mittelwertmodus des 6150AD benutzt und dabei die Messdauer T einhält:

$$NG = 5 \times \text{Sigma}_0 = 5 \times \sqrt{\frac{F \times D_0}{T}} \quad (\text{Nulleffekt } D_0 \text{ als Mittelwert am 6150AD abgelesen})$$

Diese Nachweisgrenze NG ist in der Einheit des Messgerätes, also s^{-1} , angegeben. Mit Hilfe der Kalibrierfaktoren und Wirkungsgrade aus Kapitel 6 lässt sich für jedes Nuklid die Nachweisgrenze in Einheiten der Kontamination umrechnen (Bq/cm^2 , Bq, Bq/l). Im Folgenden geben wir die Nachweisgrenze allgemein in s^{-1} an, und außerdem noch beispielhaft für einige Nuklide in Einheiten der Kontamination.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Nachweisgrenze der Sonde 6150AD-17 ($F = 0,65$) bei Direktablesung und bei Ableseung des Mittelwertes jeweils für verschiedene Nulleffekte. Als Beispiele mit aufgeführt sind die Nuklide Am-241 (Alphastrahler) und Co-60 (in kerntechnischen Anlagen vorkommender Betastrahler mit relativ geringer Maximalenergie). Da beide Nuklide ziemlich ähnliche Kalibrierfaktoren haben, sind auch ihre Nachweisgrenzen recht ähnlich.

6150AD-17							
Direktablesung, d.h. Messdauer durch Zeitkonstante τ bestimmt							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	τ s	Sigma_0 s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \text{Sigma}_0$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/cm^2		Bq
~ 0,07	32	0,027	0,13	Am-241	0,17	1,04	bei normaler Umgebungsstrahlung
				Co-60	0,21	1,3	
~ 1,0	17	0,138	0,69	Am-241	0,9	5,5	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von $1 \mu\text{Sv}/\text{h}$
				Co-60	1,1	6,9	
~ 10,0	8	0,637	3,2	Am-241	4,2	25,6	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von $10 \mu\text{Sv}/\text{h}$
				Co-60	5,1	32	
6150AD-17							
Mittelwertablesung bei den Messdauern $T = 300 \text{ s}$ und $T = 3600 \text{ s}$							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	T s	Sigma_0 s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \text{Sigma}_0$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/cm^2		Bq
~ 0,07	300	0,0123	0,062	Co-60	0,10	0,62	bei normaler Umgebungsstrahlung
	3600	0,00356	0,018		0,029	0,18	
~ 1,0	300	0,0465	0,23		0,37	2,3	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von $1 \mu\text{Sv}/\text{h}$
	3600	0,0134	0,067		0,11	0,67	
~ 10,0	300	0,147	0,74		1,18	7,4	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von $10 \mu\text{Sv}/\text{h}$
	3600	0,0425	0,21		0,34	2,1	

^A Die angegebenen Nachweisgrenzen gelten also für gleiche Messdauer von Nulleffekt und Bruttoeffekt. Wenn der Nulleffekt deutlich genauer (länger) gemessen wird, sind die Nachweisgrenzen noch etwas kleiner.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Nachweisgrenze der Sonde 6150AD-k ($F = 1,0$) in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « bei Direktablesung und bei Ableseung des Mittelwertes jeweils für verschiedene Nulleffekte. Als Beispiele mit aufgeführt sind die Nuklide Am-241 (Alphastrahler) und Co-60 (in kerntechnischen Anlagen vorkommender Betastrahler mit relativ geringer Maximalenergie). Da beide Nuklide ziemlich ähnliche Kalibrierfaktoren haben, sind auch ihre Nachweisgrenzen recht ähnlich.

6150AD-k in der Betriebsart »$\alpha\beta\gamma$«							
Direktablesung, d.h. Messdauer durch Zeitkonstante τ bestimmt							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	τ s	Σ_{α_0} s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \Sigma_{\alpha_0}$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/cm ²		Bq
~ 6	8	0,61	3,1	Am-241	0,17	30	bei normaler Umgebungsstrahlung
				Co-60	0,18	31	
~ 50	8	1,77	8,8	Am-241	0,49	84	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von 1 $\mu\text{Sv/h}$
				Co-60	0,51	88	
~ 500	8	5,59	28,0	Am-241	1,57	270	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von 10 $\mu\text{Sv/h}$
				Co-60	1,62	280	
6150AD-k in der Betriebsart »$\alpha\beta\gamma$«							
Mittelwertablesung bei den Messdauern $T = 300$ s und $T = 3600$ s							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	T s	Σ_{α_0} s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \Sigma_{\alpha_0}$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/cm ²		Bq
~ 6	300	0,141	0,707	Co-60	0,04	7,1	bei normaler Umgebungsstrahlung
	3600	0,0408	0,204		0,012	2,0	
~ 50	300	0,408	2,04		0,12	20	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von 1 $\mu\text{Sv/h}$
	3600	0,118	0,59		0,034	5,9	
~ 500	300	1,29	6,45		0,37	65	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von 10 $\mu\text{Sv/h}$
	3600	0,373	1,86		0,11	19	

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Nachweisgrenze der Sonde 6150AD-k ($F = 1,0$) in der Betriebsart » α « bei Direktablesung und bei Ableseung des Mittelwertes. Eine Betrachtung für verschiedene Nulleffekte erübrigt sich, da die Sonde in dieser Betriebsart nur auf Alphastrahlung empfindlich ist, und somit eine erhöhte Umgebungsstrahlung den Nulleffekt nicht beeinflusst. Als Beispiel ist daher auch nur der Alphastrahler Am-241 aufgeführt.

6150AD-k in der Betriebsart »α«							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	Messdauer	Σ_{α_0} s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \Sigma_{\alpha_0}$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/cm ²		Bq
~ 0,05	$\tau = 32$ s	0,028	0,14	Am-241	0,010	1,8	Direktablesung
	T = 300 s	0,0129	0,065		0,0048	0,81	Mittelwertablesung
	T = 3600 s	0,0037	0,019		0,0014	0,24	

Wenn man die Nachweisgrenzen der Sonden 6150AD-17 und 6150AD-k vergleicht, kommt man zu dem zunächst überraschenden Ergebnis, dass bei Direktablesung die Sonde 6150AD-17 der Sonde 6150AD-k ebenbürtig ist, zumindest wenn letztere in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ « betrieben wird. Bei einem solchen Vergleich darf man jedoch nicht die Größe der empfindlichen Flächen vergessen. Die Sonde 6150AD-k hat eine um den Faktor $170/6,2 = 27,4$ größere Fläche als die 6150AD-17. Um eine bestimmte Oberfläche abzutasten, muss man mit der Sonde 6150AD-17 also etwa 30-mal so viele Messungen durchführen wie mit der Sonde 6150AD-k. Außerdem dauert bei Direktablesung jede dieser 30 Messungen viermal so lange wie bei der Sonde 6150AD-k, weil die Zeitkonstante des 6150AD bei $0,07 \text{ s}^{-1}$ (Nulleffekt 6150AD-17) viermal so groß ist wie bei 6 s^{-1} (Nulleffekt 6150AD-k in der Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «). Daher ist die Sonde 6150AD-k letztlich doch deutlich »empfindlicher« als die Sonde 6150AD-17.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Nachweisgrenze der Sonde 6150AD-19 ($F = 0,8$) bei Direktablesung und bei Ableseung des Mittelwertes jeweils für verschiedene Nulleffekte. Als Beispiele mit aufgeführt sind alle die Nuklide, für die aus Abschnitt 6.2 auch Kalibrierfaktoren vorliegen. Die Nachweisgrenzen in Bq sind zwangsläufig ein Zehntel der Nachweisgrenzen in Bq/l, da das Füllvolumen 0,1 l beträgt.

6150AD-19							
Direktablesung, d.h. Messdauer durch Zeitkonstante τ bestimmt							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	τ s	Sigma $_0$ s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \text{Sigma}_0$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/l		Bq
~ 0,3	32	0,061	0,31	Cs-137	2 200	220	bei normaler Umgebungsstrahlung
				I-131	3 900	390	
				Sr-90(/Y-90)	230	23	
~ 5,0	8	0,50	2,5	Cs-137	18 000	1 800	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von $1 \mu\text{Sv/h}$
				I-131	32 000	3 200	
				Sr-90(/Y-90)	1 900	190	
6150AD-19							
Mittelwertablesung bei den Messdauern $T = 300 \text{ s}$ und $T = 3600 \text{ s}$							
Nulleffekt D_0 s^{-1}	T s	Sigma $_0$ s^{-1}	Nachweisgrenze = $5 \cdot \text{Sigma}_0$			Bemerkungen	
			s^{-1}	Nuklid	Bq/l		Bq
~ 0,3	300	0,0283	0,14	Cs-137	1 000	100	bei normaler Umgebungsstrahlung
				I-131	1 800	180	
				Sr-90(/Y-90)	110	11	
	3600	0,0082	0,041	Cs-137	290	29	
I-131				510	51		
~ 5,0	300	0,115	0,58	Sr-90(/Y-90)	440	44	bei erhöhter Umgebungsstrahlung von $1 \mu\text{Sv/h}$
				Cs-137	4 100	410	
				I-131	7 300	730	
	3600	0,0333	0,167	Cs-137	1 200	120	
I-131				2 100	210		
				Sr-90(/Y-90)	130	13	

8. Technische Daten

8.1 6150AD-17 und Zubehör

Detektor	Endfensterzählrohr LND 7231 oder Äquivalenttyp, nicht energiekompensiert, Gamma-Empfindlichkeit bei Cs-137 ca. 5600 Impulse pro μSv
Endfenster des Zählrohres	Abmessungen: Durchmesser 2,8 cm, d.h. Fläche $6,2 \text{ cm}^2$ Material: Glimmer, Flächengewicht $1,5 - 2 \text{ mg/cm}^2$
Anzeigebereiche und Warnschwellen	siehe Gebrauchsanweisung Dosisleistungsmesser 6150AD, Ausgabe Juni 2001 oder später
Umrechnung gemessene Impulsrate R in angezeigte Impulsrate D	$D = F \cdot R$ mit $F = 0,65$; dies bewirkt: bei $1 \mu\text{Sv/h}$ Cs-137-Gammastrahlung ist $D = 1 \text{ s}^{-1}$
Anzeige bei natürlicher Umgebungsstrahlung (Nulleffekt)	ca. $0,07 \text{ s}^{-1}$
Bei Überschreiten des Bereiches Überlaufanzeige bis mindestens	500 mSv/h Cs-137 Gammastrahlung
Temperaturbereich (getestet mit Cs-137 Gammastrahlung frei in Luft)	-30°C bis $+50^\circ\text{C}$, maximale Abweichung $\pm 10\%$ bezogen auf Anzeige bei $+20^\circ\text{C}$
Luftfeuchtigkeit	Nenngebrauchsbereich 0 bis 95% relative Feuchte innerhalb des Temperaturbereiches (Hinweise in Abschnitt 2.7 beachten!)
Druck der Außenluft	Nenngebrauchsbereich 60 bis 130 kPa (600 bis 1300 mbar)
Lageabhängigkeit	keine, Nenngebrauchsbereich beliebig
Stromversorgung	4,75 Volt aus Dosisleistungsmesser 6150AD
Betriebsdauer mit 6150AD (Batterie 6LR61)	ca. 650 Stunden bei kleiner Impulsrate, ohne Beleuchtung des 6150AD
Gehäuse	Aluminium schwarz eloxiert, mit aufsteckbarer Schutzkappe aus schwarzem Gummi, Schutzart IP 67 nach DIN 40050 (mit gewissen Einschränkungen wegen des Endfensters)
Abmessungen	ohne Schutzkappe: Durchmesser 40 mm, Länge 132 mm mit Schutzkappe: Durchmesser 49 mm, Länge 135 mm
Gewicht	ca. 180 g (inklusive Schutzkappe)
Länge des Sondenkabels (erforderliches Zubehör)	empfohlen 1,25 m, maximal 5 m ab S/N 117435: maximal 100 m

Optionales Zubehör für Sonde 6150AD-17:

Halterung 817.1.1-10	
Verwendung	Halterung zum Befestigen der Sonde 6150AD-17 an der Griffverlängerung 770.1-60 (siehe Zubehör zur Sonde 6150AD-k); für Messungen an schlecht zugänglichen Stellen
Abmessungen	Durchmesser 40 mm, Länge 115 mm
Material / Gewicht	Aluminium / ca. 185 g

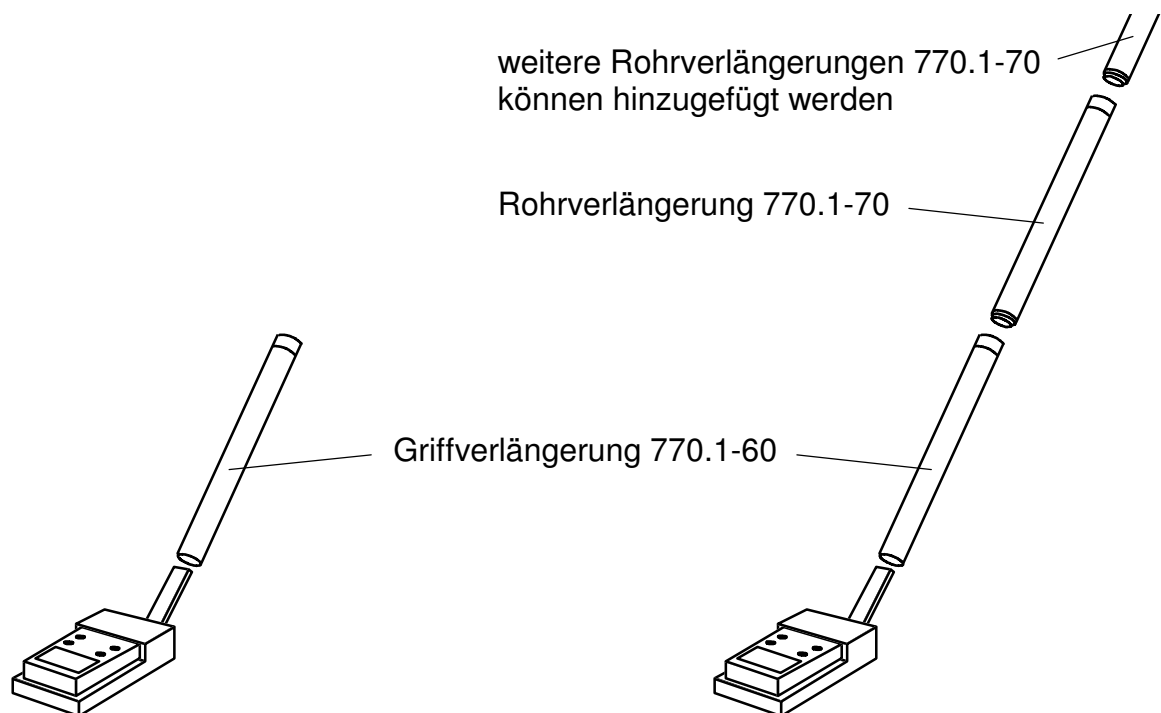
8.2 6150AD-k und Zubehör

Detektor	Großflächen-Proportionalzählrohr, geschlossen, gefüllt mit einem Edelgasgemisch (kein externes Zählgas erforderlich), Gamma-Empfindlichkeit bei Cs-137 ca. 180 000 Impulse pro μSv
Zählrohrfenster	Abmessungen: 17 cm x 10 cm, d.h. Fläche 170 cm ² Material: Aluminiumfolie, Flächengewicht 2,8 mg/cm ²
Schutzgitter	Stützgitter aus Aluminium, darüber ein zusätzliches Feingitter aus geätzttem Edelstahl; geometrische Apertur beider Schutzgitter ca. 60%, d.h. ca. 60% der Fläche des Zählrohrfensters sind nicht von den Schutzgittern verdeckt
Anzeigebereiche und Warnschwellen	siehe die Angaben zur Sondenfamilie »6150AD-0« in der Gebrauchsanweisung für den Dosisleistungsmesser 6150AD, Ausgabe Juni 2001 oder später
Umrechnung gemessene Impulsrate R in angezeigte Impulsrate D	$D = F \cdot R$ mit $F = 1,0$ (also keine Umrechnung)
Betriebsarten, umschaltbar	1) Alpha-Messung 2) Alpha-Beta-Gamma-Messung
Diskriminatorblech, aufsteckbar	Edelstahl, 1 mm dick, zur Diskriminierung von Beta- und Gammastrahlung
Anzeige bei natürlicher Umgebungsstrahlung (Nulleffekt)	in Betriebsart » α «: ca. 0,05 s ⁻¹ in Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «: ca. 6 s ⁻¹
Linearität der Anzeige	bis ca. 20 ks ⁻¹
Unterdrückung von Gammastrahlung in der Betriebsart » α «	bis ca. 100 mSv/h Cs-137 Gammastrahlung
Temperaturbereich (getestet mit Am-241 in Betriebsart » α « sowie C-14 und Sr-90 in Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «)	-15°C bis + 50°C, maximale Abweichung $\pm 15\%$ bezogen auf Anzeige bei +20°C (Hinweise in Abschnitt 2.7 beachten!)
Luftfeuchtigkeit	Nenngebrauchsbereich 0 bis 95% relative Feuchte innerhalb des Temperaturbereiches (Hinweise in Abschnitt 2.7 beachten!)
Druck der Außenluft	Nenngebrauchsbereich 60 bis 130 kPa (600 bis 1300 mbar)
Lageabhängigkeit	keine, Nenngebrauchsbereich beliebig
Stromversorgung	4,75 Volt aus Dosisleistungsmesser 6150AD
Betriebsdauer mit 6150AD (Batterie 6LR61)	ca. 300 Stunden bei kleiner Impulsrate, ohne Beleuchtung des 6150AD
Gehäuse	Aluminium, Schutzart IP 67 nach DIN 40050
Abmessungen	210 x 120 x 90 mm ³
Gewicht	ca. 1,7 kg inklusive 6150AD
Länge des Sondenkabels (optionales Zubehör)	maximal 100 m; ein externes Sondenkabel ist nur erforderlich, wenn die Sonde 6150AD-k abgesetzt vom 6150AD betrieben werden soll

Optionales Zubehör für Sonde 6150AD-k:

Griffverlängerung 770.1-60	
Verwendung	Verlängerung des Griffes der Sonde 6150AD-k; für Messungen an schlecht zugänglichen Stellen
Abmessungen	Durchmesser 30 mm, Länge 770 mm
Material / Gewicht	Aluminium / ca. 430 g

Rohrverlängerung 770.1-70	
Verwendung	Zusätzliche Verlängerung der Griffverlängerung 770.1-60
Abmessungen	Durchmesser 30 mm, Länge 775 mm
Material / Gewicht	Aluminium / ca. 450 g



Wandhalter 770.1-80	
Verwendung	Aufbewahrung der Sonde 6150AD-k an einer Wand (inklusive aufgesetztem Dosisleistungsmesser 6150AD)
Abmessungen	Höhe 225 mm, Breite 120 mm, Tiefe 80 mm
Material / Gewicht	Aluminium und Kunststoff / ca. 550 g

Prüfstrahler 6708 (Details finden sich im separaten Datenblatt des 6708)	
Verwendung	Radiologische Funktionskontrolle
Radioaktive Stoffe	1) Americium 241 als festes Oxid, Aktivität 1 kBq $\pm 30\%$ 2) Strontium 90 als festes Oxid, Aktivität 2 kBq $\pm 30\%$
Kontrollanzeige mit 6150AD-k	in Betriebsart » α «: ca. 90 s ⁻¹ in Betriebsart » $\alpha\beta\gamma$ «: ca. 500 s ⁻¹
Abmessungen	Durchmesser 50 mm, Höhe 3 mm, aktiver Durchmesser 36 mm

8.3 6150AD-19 und Zubehör

Detektor	Becherzählrohr für Flüssigkeiten, Wandstärke ca. 25 mg/cm ² , empfindliche Zählrohrlänge 6 cm, Gamma-Empfindlichkeit bei Freiluft-Bestrahlung mit Cs-137 ca. 22 000 Impulse pro µSv
Bechervolumen	100 cm ³
Anzeigebereiche und Warnschwellen	siehe Gebrauchsanweisung Dosisleistungsmesser 6150AD, Ausgabe Juni 2001 oder später
Umrechnung gemessene Impulsrate R in angezeigte Impulsrate D	$D = F \cdot R$ mit $F = 0,8$; dies bewirkt: bei 1 µSv/h Cs-137-Gammastrahlung frei in Luft ist $D = 5 \text{ s}^{-1}$
Anzeige bei natürlicher Umgebungsstrahlung (Nulleffekt)	ca. 0,2 bis 0,3 s ⁻¹
Bei Überschreiten des Bereiches Überlaufanzeige bis mindestens	100 mSv/h Cs-137 Gammastrahlung
Temperaturbereich (getestet mit Cs-137 Gammastrahlung frei in Luft)	-30°C bis + 50°C, maximale Abweichung ±10% bezogen auf Anzeige bei +20°C
Luftfeuchtigkeit	Nenngebrauchsbereich 0 bis 95% relative Feuchte innerhalb des Temperaturbereiches
Druck der Außenluft	Nenngebrauchsbereich 60 bis 130 kPa (600 bis 1300 mbar)
Einfluss von Licht	kann nicht völlig ausgeschlossen werden. Daher während einer Messung immer die Schutzhaube aufschrauben, damit das Zählrohr keinem Licht ausgesetzt ist!
Stromversorgung	4,75 Volt aus Dosisleistungsmesser 6150AD
Betriebsdauer mit 6150AD (Batterie 6LR61)	ca. 650 Stunden bei kleiner Impulsrate, ohne Beleuchtung des 6150AD
Gehäuse	Aluminiumsockel schwarz eloxiert, mit aufschraubbarer Schutzhaube aus Kunststoff
Abmessungen inkl. Schutzhaube	Durchmesser 70 mm, Höhe 205 mm
Gewicht	ca. 550 g (inklusive Schutzkappe)
Länge des Sondenkabels (erforderliches Zubehör)	empfohlen 1,25 m, maximal 5 m

Optionales Zubehör für Sonde 6150AD-19:

Messbecher MB09-0003	
Verwendung	Messbecher mit Skala zum Abmessen der erforderlichen Füllmenge von 100 cm ³ (100 ml)
Material	weißer Kunststoff

