

## Abschätzung der effektiven Körperdosis aus der Aktivität von Radionukliden

Bernd Laquai

9.7.2012

Die korrekte Berechnung einer Strahlendosis ist äußerst komplex und erfordert eine aufwändige Modellbildung der bestrahlten Materie. Allerdings kann man sich auch schon mit einfacher Mathematik einen Überblick über auftretende Dosiswerte verschaffen, wenn man die Strahlungsquelle in etwa kennt. Normalerweise geht man zur Berechnung der Dosis von der Aktivität der Quelle aus, welche in Becquerel (Zerfallsakte pro Sekunde) gemessen wird.

Eine Strahlendosis bezieht sich ganz generell auf die von einer Materie absorbierten Strahlung. Im Prinzip kann man eine Dosis für jede Materie berechnen, meist bezieht man sich dabei aber auf Luft, Wasser oder biologisches Gewebe von Organen. Um die Wirkung von Strahlung als Dosis abzuschätzen orientiert man sich an der Energie, die von der bestrahlten Materie absorbiert wird. Allerdings muss man hier bereits berücksichtigen, dass es punktförmige Strahlungsquellen gibt wie auch ganze Strahlungsflächen, die zum Beispiel kontaminiert sind. Bei Flächenstrahlern wird die spezifische Aktivität in  $\text{Bq/m}^2$  angegeben. Nun muss berechnet werden, wie viel Energie der Strahlung aus der Quelle im Volumen der betrachteten Materie ankommt. Das ist bei Punktquellen bzw. Flächenquellen unterschiedlich. Wird eine gewisse Menge eines Strahlers in Form von Aerosolen eingeatmet (inhaliert) oder werden Partikel verschluckt (Ingestion), ist die Situation wieder anders. Allerdings kann man jetzt davon ausgehen, dass alle emittierte Strahlungsenergie der Quelle auch im Körper freigesetzt wird. Auf der anderen Seite muss man bei Inhalation und Ingestion nun wieder berücksichtigen, dass durch Stoffwechselaktivitäten die Strahlenquelle wieder ausgeschieden werden kann oder auch in Zellen eingebaut wird, wenn der Körper das Radionuklid der Quelle mit dem normalen stabilen Isotop verwechselt, das er für seine biologische Funktion braucht. Die Energiedosis, welche schließlich absorbiert wird, wird in der aus der SI-Einheit J/kg direkt abgeleiteten Einheit Gray angegeben.

Da man Energie schlecht messen kann, orientiert man sich in der Messtechnik (Dosimetrie) an der elektrischen Ladung die durch die Ionisierung der Materie infolge der eingestrahnten Energie erzeugt wird. Auch da ist es so, dass die Berechnung nicht ganz einfach ist, da für die Ionisierung einer Materie eine gewisse Mindestenergie nötig ist. Das wird durch das materieabhängige Ionisierungsvermögen der Strahlung beschrieben. Man muss also die Energiedosis aus der Ionendosis und dem Ionisierungsvermögen berechnen. Dann ist es noch so, dass ein in die betrachtete Materie eindringendes Strahlungsquantum seine Energie durch Ionisation über eine gewisse Strecke verliert (linearer Energie transfer, LET). Tendentiell werden aber vor allem bei schweren Teilchen (z.B. bei der Alphastrahlung) erst gegen Ende, wenn das Teilchen nur noch wenig Energie besitzt, die meisten Ionen

erzeugt. D.h. je nach Ort ist die Ionendosis und damit die Energiedosis unterschiedlich, was auch in der medizinischen Strahlentherapie genutzt wird. Die Ionendosis wird in C/kg angegeben (früher wurde die Einheit Röntgen dafür benutzt).

Wenn nun eine Strahlung auf biologisches Gewebe eines Körpers oder auf einen Menschen insgesamt einwirkt, dann ist die absorbierte Energie noch nicht völlig ausreichend um die Wirkung der Strahlenexposition quantitativ und vergleichend zu beschreiben. Je nach Strahlungsart, Geschlecht und Alter eines Menschen oder Art eines Organs muss eine weitere Gewichtung erfolgen, die nur durch Experimente oder durch Beurteilung von Strahlenopfern bei Unfällen und Katastrophen gewonnen werden kann. Diese Dosis heisst effektive Körperdosis und soll die Wirkung von unterschiedlichen Strahlungsquellen auf die Summe der menschlichen Organe vergleichbar machen. Diese Körperdosis wird in Sievert (früher „roentgen equivalent man“, rem) angegeben. Die Äquivalentdosis (Ortsdosis bzw. Personendosis), die auch in Sievert angegeben wird, wird dagegen nur für eine äußere Strahlen-Exposition verwendet (Wirkung durch nur die Körperoberfläche).

Da die oben beschriebene Berechnung mit anschließender Gewichtung ein sehr aufwändiges Verfahren ist, wird statt der komplizierten Berechnung über die Energiedosis auf sogenannte Dosiskoeffizienten bzw. Dosisfaktoren zurückgegriffen, die von amtlichen Stellen (in Deutschland das BfS) publiziert werden. Diese Dosiskoeffizienten, angegeben in Sv/Bq (getrennt für Inhalation und Ingestion) oder Sv/(Bq/m<sup>2</sup>) für die äußere Exposition, spiegeln auch die sich immer wieder ändernden Erkenntnisse der Wissenschaft hinsichtlich der biologischen Bewertung wieder.

Wenn nun eine radioaktive Probe vorliegt, muss man sich für eine einfache Abschätzung zunächst klarmachen, dass neben dem primären Radionuklid, das man in der Probe betrachtet, meist auch alle anderen Folgeprodukte der Zerfallsreihe zu finden sind. Immer wenn ein Zerfall des primären Nuklids stattfindet, werden relativ schnell die kurzlebigeren Folgeprodukte gebildet, so dass diese die selbe Aktivität erzeugen, wie das primäre Nuklid (radioaktives Gleichgewicht). Erst wenn ein Folgeprodukt mit deutlich größerer Halbwertszeit in der Zerfallskette auftritt reduziert dieses die Aktivitäten der nachfolgenden Folgeprodukte in der weiteren Zerfallskette. Die Gesamtaktivität ist daher immer die Summe der Aktivitäten aller Folgeprodukte. Trotzdem bezieht man in den meisten Fällen die Aktivität der Quelle nur auf die Aktivität des primären Radionuklids.

Das Zerfallsgesetz, das man in der Schule lernt, beschreibt die Aktivität A (Zahl der Zerfallsakte pro Sekunde) in Abhängigkeit der Zahl der noch vorhandenen Kerne eines Nuklids  $N_0$  und dessen Zerfallskonstante  $\lambda$ .

$$A = -dN/dt = \lambda * N_0$$

Diese Differentialgleichung hat die Lösung:

$$N=N_0 e^{-\lambda t}$$

Genauso gilt dann für die Aktivität:

$$A=A_0 e^{-\lambda t}$$

Allerdings ist weder die Zerfallskonstante  $\lambda$  noch die Zahl der Atome, das was in der Praxis bekannt ist. Anstelle der Zerfallskonstante wird nämlich meist die Halbwertszeit  $t_{50}$  angegeben, die besagt nach welcher Zeit 50% der Atome einer Ausgangsmenge zerfallen sind. Umrechnen kann man das wie folgt:

$$\lambda=\ln(2)/t_{50}=0.693/t_{50}$$

Um jetzt die Aktivität eines Gramms eines Radionuklids zu berechnen, muss man die Zahl der Atome die in einem Gramm enthalten sind kennen. Wenn die Atommasse  $M$  des Radionuklids aber bekannt ist, dann gibt diese ja im wesentlichen die Zahl der Protonen und Neutronen im Kern an. Das Gewicht von Protonen und Neutronen in Gramm ergibt sich aus dem Kehrwert der Avogadro-Konstante von  $6.023E23$  und beträgt  $1.66E-24$  g. Damit ergibt sich die Ausgangszahl der Kerne zu

$$N_0=1g/(M*1.66E-24 \text{ g})$$

Daher ist die Aktivität von 1g eines Radionuklids in Becquerel (Bq) :

$$A=1g/(M*1.66E-24 \text{ g}) * \lambda=1/(M*1.66E-24) * 0.693/t_{50}$$

Wenn nun das Radionuklid nur zu einem gewissen Prozentsatz in einem Isotopengemisch enthalten ist, dann muss das auch entsprechend berücksichtigt werden. So ist beispielsweise im natürlichen Kalium das Radionuklid K-40 nur mit 0.0117% enthalten, das eine Halbwertszeit von  $1.277E9$  Jahre hat. Somit ist die Aktivität von 1g des natürlichen Kalium:

$$A=0.0117*0.01*1/(40*1.66E-24) * 0.693/(1.277E9*365*24*3600)=30.32Bq$$

Nun enthält beispielsweise ein kg Bananen etwa 4g natürliches Kalium. Damit liegt die natürliche Radioaktivität von Bananen bei etwa 120Bq/kg. Der Dosiskoeffizient für Ingestion (Nahrungsaufnahme) wird für das Kalium 40 derzeit mit  $6.2E-9$  Sv/Bq beim Erwachsenen Menschen angegeben. Damit beträgt die Körperdosis für Bananen bei etwa  $0.7\mu\text{Sv} / \text{kg}$ . Diese Dosis wird ironischerweise auch als Banana Equivalent Dose (BED) bezeichnet.