

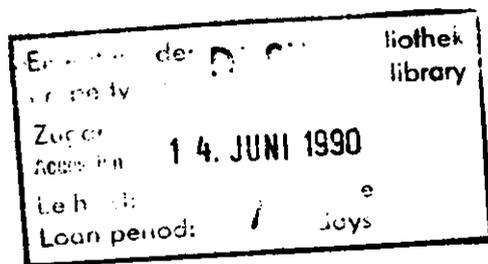
Interner Bericht

DESY-D3-68

April 1990

Das Verhältnis von interner Dosis durch Inhalation
zu externer Dosis bei der Bearbeitung radioaktiver
Beschleunigerkomponenten

K. Tesch



DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

**“Die Verantwortung für den Inhalt dieses
Internen Berichtes liegt ausschließlich beim Verfasser“**

Das Verhältnis von interner Dosis durch Inhalation zu externer Dosis bei der Bearbeitung radioaktiver Beschleunigerkomponenten

K. Tesch

Zusammenfassung

Das Verhältnis von interner Dosis (effektive Dosis und Lungendosis) durch Inhalation zu externer Dosis durch γ -Strahlung bei der Bearbeitung von radioaktiven Beschleunigerkomponenten wird abgeschätzt. Grundlage sind experimentell bestimmte Verteilungen radioaktiver Nuklide in verschiedenen Werkstoffen sowie gemessene Aerosolkonzentrationen bei der Bearbeitung von Stahl. Es zeigt sich, daß ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen der Beitrag der internen Dosis zur gesamten Strahlenbelastung nicht zu vernachlässigen ist, er ist jedoch nicht größer als die leicht meßbare externe γ -Dosis.

Abstract

An estimation has been made of the ratio between the internal dose (effective dose equivalent and lung dose equivalent) due to inhalation, to the external dose due to γ -radiation when machining radioactive accelerator components. This is based upon experimentally obtained distributions of radioactive nuclides in various materials as well as measured aerosol concentrations when working with steel. It is shown that unless additional precautions are taken the contribution of the internal dose to the total radiation dose cannot be ignored—however, it does not exceed the easily measurable external γ -dose.

1. Einleitung

Werden die Komponenten eines Beschleunigers durch den Betrieb aktiviert, so gelten sie als offene radioaktive Stoffe. Typisch ist ihre geringe spezifische Aktivität im Vergleich zu kommerziellen Strahlungsquellen. Beim normalen Umgang mit ihnen (z. B. bei Montagen) besteht kein zusätzliches Risiko durch Inkorporation von radioaktiven Nukliden, da diese im inaktiven Material fest eingebaut sind. Die bei diesem Umgang erhaltene Dosis rührt her von externer γ -Strahlung und zu einem kleinen Teil von β -Strahlung, die γ -Dosis ist leicht zu messen. Anders verhält es sich bei gelegentlich vorkommenden Bearbeitungen wie Sägen, Bohren, Schleifen oder Schweißen, bei denen radioaktive atembare Aerosole erzeugt werden. Derartige Bearbeitungen und die mit ihnen verbundene externe Strahlenbelastung dauern normalerweise nicht lange, dagegen können inhalierte Aerosole sich längere Zeit im Körper aufhalten, die zusätzliche interne Dosis ist schwer abzuschätzen, und sie kann nicht gemessen werden.

Atembare Aerosole haben Durchmesser in der Größenordnung $10\ \mu\text{m}$ bis $0,1\ \mu\text{m}$, sie können im gesamten Lungenraum deponiert werden und gelangen von dort in den Magen-Darm-Trakt oder durch Endocytose mittels Makrophagen in die Blutbahn. Teilchen oberhalb von $10\ \mu\text{m}$ stellen im allgemeinen kein Risiko dar, da sie durch die Schwerkraft schnell zu Boden sinken. Aerosole mit Durchmesser unter $0,1\ \mu\text{m}$ diffundieren durch Brownsche Bewegung, ihre große spezifische Oberfläche begünstigt chemische Reaktionen, so daß sie sich in der Luft an größere Partikel anlagern.

Im folgenden soll die 50-Jahre-Folgedosis durch Inhalation radioaktiver Aerosole, d. h. die Dosis, die sich nach einer kurzfristigen Bearbeitung eines aktivierten Werkstückes über die folgenden 50 Jahre aufsummiert, abgeschätzt werden und verglichen werden mit der während der Arbeit erhaltenen externen γ -Dosis. Als Grundlage dienen zwei Arbeiten. In Lit. 1 wurden experimentell bestimmte Sättigungsaktivitäten zahlreicher Materialien angegeben, die durch Streustrahlung in der Nähe von Elektronenbeschleunigern aktiviert wurden. Aufgeführt sind für jedes Material nur der relative Anteil jedes Nuklids bei einer unendlich langen Aktivierungszeit, was aber für den vorliegenden Zweck ausreicht. Lit. 2 ist eine Pilotstudie über die Erzeugung von Aerosolen bei verschiedenen Verfahren zur Trennung von Stahl (in Zusammenhang mit der Entsorgung von Kernkraftwerken). Mit einer ganzen Batterie von Meßgeräten wurden hier Aerosolkonzentrationen im Größenbereich $10\ \mu\text{m}$ bis $0,05\ \mu\text{m}$ bestimmt. Aus der Kombination der Resultate beider Arbeiten kann das Verhältnis von interner zu externer Dosis bestimmt werden.

Eine ähnliche Abschätzung wurde von Donahue (Lit. 3) durchgeführt. Seine Schlußfolgerung, daß die interne Dosis gegenüber der externen Dosis zu vernachlässigen ist, kann jedoch nicht bestätigt werden. Die Gründe hierfür werden aufgeführt.

2. Berechnung von externer und interner Dosis

Im folgenden werden die Informationen aufgelistet, die zur Verfügung stehen für die Berechnung des Verhältnisses von interner Dosis durch Inhalation bei Bearbeitung von Materialien zu dabei erhaltener externer Dosis, sowie die Annahmen, die zur Vereinfachung des Problems notwendig sind. Wir beschränken uns auf die Materialien Aluminium, Titan, Eisen, Kupfer, Blei, Stahl (71% Fe, 20% Cu, 8% Ni) und Messing (55% Cu, 45% Zn).

a) Es wurden Proben von 11 Materialien an 21 Orten entlang von hochenergetischen Elektronenbeschleunigern deponiert und während 136 Tagen bestrahlt. Danach wurden die Proben analysiert, nach einer Ruhezeit von 32 Tagen erneut über 130 Tage aktiviert und wieder ausgemessen (Lit. 1). Damit wurden alle Nuklide mit Halbwertszeiten unter ca. 5 Jahren erfaßt, falls die Wirkungsquerschnitte meßbare Pulsraten erwarten ließen. Die Analyse erfolgte mit einem empfindlichen Ge(Li)-Detektor hoher Auflösung (2,3 keV bei $E_\gamma = 1,33$ MeV). Alle Aktivitäten wurden auf Sättigungsaktivitäten umgerechnet. Der relative Anteil eines jeden Nuklids an der zur γ -Dosis beitragenden Gesamtaktivität der Probe wurde über alle Meßstellen gemittelt und ist als relative Sättigungsaktivität in Tab. 1, Spalte 3 eingetragen. Folgende Nuklide, die in Lit. 1 nicht erfaßt wurden, sind hinzugefügt: ^{55}Fe ($E_\gamma = 6$ keV) bei Eisen und Stahl, ^{63}Ni (reiner β -Strahler) bei Kupfer und Messing, ^{64}Cu (β - und e^+ -Strahler) bei Kupfer, ^{204}Tl (reiner β -Strahler) bei Blei. Ihre Sättigungsaktivität relativ zu der eines mit guter Statistik gemessenen Nuklides wurde aus Rechnungen von Swanson (Lit. 4) entnommen. Insgesamt stimmen die Werte der Tab. 1, Spalte 3 nicht gut mit den theoretischen Werten von Swanson überein. Dies liegt an der ungenauen Kenntnis der Wirkungsquerschnitte und an dem Umstand, daß Swanson als aktivierendes Photonenfeld eine in einem dicken Target voll entwickelte elektromagnetische Kaskade voraussetzt, während in dem Aktivierungsexperiment am DESY über 21 Streustrahlungsfelder entlang von Beschleunigern gemittelt wurde, eine Situation, die für den vorliegenden Fall realistischer erscheint.

b) Für langlebige Nuklide ist die Annahme einer Sättigungsaktivität unrealistisch. Um die Abhängigkeit von der Aktivierungszeit t_1 und Abklingzeit t_2 zu studieren, haben wir für jedes Material die γ -Dosisleistung für $t_1 = 50$ d und $t_1 = 500$ d und für $t_2 = 10^{-1} \dots 10^3$ d berechnet, wobei für jedes Material die Dosisleistung für $t_1 = \infty$, $t_2 = 0$ in einer konstanten Entfernung gleich 1 gesetzt wurde; die Ergebnisse sind in Abb. 1a + b dargestellt. Die Dosisleistungskonstanten wurden Lit. 5 entnommen. Auf Grund dieser Kurvenschar legen wir $t_1 = 150$ d und $t_2 = 3$ d als repräsentative Werte für die weiteren Rechnungen fest.

c) Die Dosisleistung eines in einem gegebenen Strahlungsfeld aktivierten Werkstücks hängt in komplizierter Weise von Masse, Gestalt, Material, Aktivitätsverteilung und den Zeiten t_1 und t_2 ab. Wir sind jedoch nur an dem Verhältnis von interner Dosis durch Inhalation zu externer Dosis interessiert. Hierfür nehmen wir an, daß alle Materialien eine Masse von 1 kg haben und homogen aktiviert sind. Als typischer Arbeitsabstand wird 30 cm gewählt. Zur Berechnung der Dosisleistung kann die Probe dann punktförmig angenommen werden. (Der Unterschied zwischen Punktquelle und Flächenquelle von 40 cm \varnothing ist für diesen Abstand kleiner als 20%). Der Beitrag von β -Strahlern und von ^{55}Fe zur externen Dosis wird vernachlässigt. Ebenso vernachlässigt wird die Schwächung von γ -Strahlung in der Probe. Mit diesen Annahmen wird das gesuchte Verhältnis eher überschätzt; schwerere Werkstücke gleicher Aktivitätskonzentration erzeugen bei gleichbleibender interner Dosis durch Bearbeitung eine höhere externe Dosisleistung, was allerdings durch ansteigende Selbstabsorption der Photonen im Werkstück teilweise wieder kompensiert wird. Mit Hilfe der Werte in Tab. 1, Spalte 3 und der Annahme $t_1 = 150$ d, $t_2 = 3$ d (siehe Abschnitt b) berechnen wir die Aktivitätskonzentrationen in den 1-kg-Proben so, daß sich in 30 cm Abstand eine Dosisleistung von 1 mSv/h ergibt. Die Konzentrationen sind in Tab. 1, Spalte 4 eingetragen.

d) Bei einer Bearbeitung des im vorigen Abschnitt beschriebenen Materialstücks werden Aerosole produziert. Die entstehende Aerosolkonzentration hängt ab vom Material, der Art der Bearbeitung und der Ventilationsrate am Arbeitsplatz. Die Aerosolkonzentration entnehmen wir Lit. 2. In dieser Arbeit wurden mit hohem Meßaufwand die Konzentrationen (ausgedrückt in mg/m^3) bestimmt, die bei verschiedenen Trennvorgängen auftreten. Edelstahlrohre wurden mit folgenden Werkzeugen getrennt: Rohrschneider, Bügelsäge, Bandsäge, Winkelschleifer, Trennscheibe, Sauerstoff-Azethylen-Schweißgerät, elektrisches Schweißgerät (300 A), Plasma-Schweißgerät. Der Testraum hatte ein Volumen von 20 m^3 und eine starke Belüftung von $8,5 \text{ m}^3/\text{min}$, um eine gute Durchmischung der direkt in die Raumluft abgegebenen Aerosole zu erreichen. Die Arbeiten wurden von einem erfahrenen Handwerker und neuwertigem Werkzeug durchgeführt. Wir nehmen an, daß diese bei der Trennung von Stahl erhaltenen Konzentrationen auch auf die anderen in Tab. 1 genannten Materialien übertragen werden können. Für Blei ist dies wahrscheinlich eine schlechte Näherung; wir halten trotzdem an ihr fest, da das Endergebnis zeigt, daß Blei das kleinste Verhältnis interne Dosis/externe Dosis hat. Nach Lit. 2 erzeugt eine bestimmte Säge eine Aerosolkonzentration von $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ bei einer Ventilationsrate von $8,5 \text{ m}^3/\text{min}$. Halten wir diese beiden Zahlen zunächst fest, so ergeben sich die erzeugten Luftaktivitätskonzentrationen (in Bq/m^3) für jedes Nuklid durch Division der Werte von Tab. 1, Spalte 4 durch 1000.

e) Die durch Inhalation von Nukliden erzeugten effektive Dosis und Teilkörperdosen werden mit Hilfe von Dosisfaktoren berechnet. Die effektive Dosis ist in Lit. 6 definiert. Die Dosen hängen davon ab, wie lange ein Nuklid in der Lunge zurückgehalten wird. Das zeitliche Verhalten von Deposition im und Entfernung aus dem Lungenraum hängt ab von der chemischen Verbindung, die das Nuklid eingegangen ist. Die Verbindungen werden in 3 Lungenretentionsklassen eingeteilt. (Eine Beschreibung des zugrunde liegenden Lungenmodells findet man in Lit. 8 und 9). In unserem Fall handelt es sich um Aerosole in metallischer Form. Für diese ist nur bei Aluminium die Klasse W vorgesehen, bei Ti, Fe und Cu werden "sonstige Verbindungen" in Klasse D geführt (was kürzeste Verweildauer im Lungenraum bedeutet). Für die im Aluminium produzierten Isotope ^{22}Na und ^{24}Na ist jedoch nur die Klasse D vorgesehen, so daß wir für alle Isotope die kürzeste Retentionszeit wählen. Es ist dies die Klasse D für alle Isotope außer den Co-Isotopen (Klasse W) und den Sc-Isotopen und ^{65}Zn (Klasse Y). Bei der Berechnung der Teilkörperdosen zeigt es sich, daß wir außer der effektiven Dosis nur die Lungendosis zu betrachten brauchen. Nur die Na-Isotope erzeugen bei Inhalation im roten Knochenmark eine um 50% höhere Dosis als in der Lunge, was im folgenden vernachlässigt wird. Die benötigten Dosisfaktoren entnehmen wir Lit. 7.

f) Die effektive Äquivalentdosis und die Lungendosis für eine gegebene Verweildauer einer Person in der aerosolhaltigen Luft ergibt sich aus dem Produkt der Aktivitätskonzentrationen, der Dosisfaktoren und der mittleren Atemrate. Letztere beträgt $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

3. Endergebnis und Beurteilung

In Tabelle 1, Spalte 5 und 6 sind für jedes Nuklid die über lange Zeiten akkumulierte effektive Dosis und Lungendosis aufgeführt für einen einstündigen Aufenthalt in der Luft mit den in Abschnitt 2d berechneten Aktivitätskonzentrationen, die Beiträge der einzelnen Nuklide für jedes der sieben Materialien sind addiert. Die Konzentrationen in Luft resultieren aus einer Bearbeitung von Materialien mit den in Abschnitt 2c berechneten Aktivitätskonzentrationen so, daß eine Aerosolkonzentration von 1 mg/m^3 entsteht bei einer Ventilationsrate von $8,5 \text{ m}^3/\text{min}$.

Eine derartige Ventilationsrate ist für Werkstätten ziemlich hoch. Nach der deutschen Arbeitsstättenrichtlinie (Lit. 10) sind bei überwiegend sitzender Tätigkeit $20\text{--}40 \text{ m}^3$ pro Stunde und Person vorgesehen, bei nicht sitzender Tätigkeit $40\text{--}60 \text{ m}^3$, bei schwerer körperlicher Arbeit mehr als 65 m^3 . Arbeiten an aktivierten Werkstücken werden meistens nicht in einer großen Werkstatt durchgeführt, sondern in einem kleineren Raum mit einer Belüftung, die für wenige Personen ausreichend ist. Daher nehmen wir eine konservative Ventilationsrate von $1 \text{ m}^3/\text{min}$ an.

Die in Lit. 2 gemessenen Aerosolkonzentrationen bei Anwendung verschiedener Werkzeugmaschinen zur Trennung von Stahlrohren lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bügelsäge, Bandsäge, Winkelschleifer und Trennscheibe: 1 bis 12 mg/m^3 , Mittelwert 5 mg/m^3 ; Trennschweißen mit Sauerstoff-Azethylen-Flamme, elektrisches Schweißgerät, Plasmaschweißgerät: $15\text{--}60 \text{ mg/m}^3$, Mittelwert 40 mg/m^3 . Mit diesen Mittelwerten für mechanische Trennung und Trennschweißen, vergrößert um den Faktor $8,5$ wegen der geringeren Ventilationsrate, erhält man für jedes Material die internen Dosen.

Die berechneten internen Dosen (effektive Dosis und Lungendosis) und die externe Dosis werden ins Verhältnis gesetzt zu den jeweiligen maximal zulässigen Dosen pro Jahr für eine beruflich strahlenexponierte Person (Kategorie A). Diese betragen für die effektive Dosis 50 mSv , für die Lunge 150 mSv , und für die externe Dosis 50 mSv . Zur Beurteilung des Verhältnisses von interner zu externer Strahlenbelastung bei Bearbeitung aktivierter Materialien wird gebildet

$$R = \frac{\frac{\text{interne Dosis}}{\text{max. zulässige int. Dosis}}}{\frac{\text{externe Dosis}}{\text{max. zulässige ext. Dosis}}}$$

der Nenner ist $1 \text{ mSv} / 50 \text{ mSv} = 0,02$. Die R-Werte sind in Tab. 2 eingetragen.

Die Verhältnisse R sind recht ungenau, sie könnten

a) *kleiner sein*: Beim Trennschweißen wird bei stationären Anlagen der Gasstrom in der Regel in die Außenluft abgeblasen und nicht wie in der Anordnung von Lit. 2 in der Werkstatt gelassen. Bei dieser Arbeit ist die Aerosolproduktion besonders hoch: $2\text{--}8\%$ des Materials der Schnittbreite wird in atembare Aerosole überführt, bei der mechanischen Trennung sind es nur $0,2\text{--}3\%$ (Lit. 2). Beim Zusammenschweißen ist die Aerosolproduktion erheblich kleiner. Ferner kann in großen, gut durchlüfteten Werkstätten die Ventilationsrate höher

als $1 \text{ m}^3/\text{min}$ sein. Die externe Dosis wird auch höher sein, weil der Handwerker vor der eigentlichen Bearbeitung mit Transport und Arbeitsvorbereitung am Werkstück beschäftigt ist.

b) *größer sein*: Die R-Werte sind nur Schätzwerte, ihre größte Unsicherheit sind die Ausdehnung der Ergebnisse von Lit. 2 über die Trennung von Stahl auf die anderen Materialien und die Unsicherheit der Dosisfaktoren f , hier besonders die Wahl der Retentionsklasse, die nur eine sehr grobe Einteilung darstellt. Wir haben stets die Klasse mit der kleinsten Verweildauer der Nuklide in der Lunge gewählt auf Grund von Lit. 8 und 9; eine um eine Klasse höhere Retention würde für die Nuklide ^{55}Fe , ^{54}Mn und die Co-Isotope eine um einen Faktor 2–10 höhere Lungendosis ergeben. Außerdem wurde bei der Berechnung der externen Dosis die Selbstabschirmung im Werkstück nicht berücksichtigt.

Auf Grund dieser Unsicherheiten erscheint folgende Zusammenfassung gerechtfertigt: Bei der Bearbeitung von aktivierten Werkstücken ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen (Atemmasken mit Filtern) ist der Beitrag der internen Strahlenbelastung durch Inhalation zur Gesamtdosis nicht zu vernachlässigen, er ist jedoch nicht größer als die (leicht meßbare) externe Dosis durch γ -Strahlung.

Die Überlegungen basieren auf einem Aktivierungsexperiment, das an Elektronenbeschleunigern durchgeführt wurde. An Ionenbeschleunigern ist die Isotopenzusammensetzung der aktivierten Komponenten eine andere. Da aber das Verhältnis interne Dosis/externe Dosis nicht sehr stark vom Isotopengemisch abhängt, sollten die Schlußfolgerungen auch für Ionenbeschleuniger gelten.

Unsere Schlußfolgerung stimmt nicht mit der Arbeit von Donahue (Lit. 3) überein, der zu dem Ergebnis kommt, daß die interne Dosis gegenüber der externen Dosis zu vernachlässigen ist. Die 3 Hauptgründe für diese Abweichung sind folgende: Die in Tab. 3 (Lit. 3) angegebenen Aktivitätswerte sind im Falle von Eisen zu gering, sie ergeben in 30 cm Abstand nur eine Dosisleistung von $0,14 \text{ mSv/h}$ anstatt 1 mSv/h . Die Ventilationsrate von $8,5 \text{ m}^3/\text{min}$ des Testaufbaus aus Lit. 2 wurde übernommen, während uns eine Rate von $1 \text{ m}^3/\text{min}$ realistischer erscheint. Eine genauere Diskussion der Lungendosis fehlt. Außerdem weicht die von uns experimentell gefundene Nuklid-Verteilung von den theoretischen Werten von Swanson ab, insbesondere im Fall von Kupfer.

4. Literatur

1. Amsinck, K. und Dinter, H.. Untersuchung aktivierter Materialien.
Interner Bericht DESY D3/30.
2. Newton, G. J., Hoover, M. D., Barr, E. B., Wong, B. A., and Ritter, P. D.,
Collection and characterization of aerosols from metal cutting techniques typically
used in decommissioning nuclear facilities.
Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 48, 922-932 (1987).
3. Donahue, R. J. Calculation of internal radiation exposures at a high-energy
electron accelerator.
Radiation Protection Dosimetry 29, 189-194 (1989)
4. Swanson, W. P., Radiological safety aspects of the operation of electron linear
accelerators.
IAEA, Technical Report Series No. 188, Vienna 1979.
5. Dorner, R. und Vogt, H. G., Photonenstrahlenkonstanten.
In: Physik Daten Nr. 28-3 (1986),
Fachinformationszentrum Karlsruhe.
6. International Commission on Radiological Protection,
A compilation of the major concepts and quantities in use by ICRP.
ICRP Publ. 42, Pergamon Press 1984.
7. Noßke, D., Gerich, B., and Langner, S. Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion
von Radionuklidverbindungen. Institut für Strahlenhygiene des
Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg, ISA-Heft 63 (1985).
Die Daten sind Bestandteil der Deutschen Strahlenschutzverordnung.
8. Task Group of Lung Dynamics, Deposition and retention models for internal
dosimetry of the human respiratory tract.
Health Physics 12, 173-207 (1966).
9. International Commission on Radiological Protection,
Limits for intakes of radionuclides by workers.
ICRP Pub. 30, Pergamon Press 1978.
10. Tentrop, F. und Wienecke, J. Kommentar zum medizinischen
und technischen Arbeitsschutz,
Verlag Kohlhammer, Stuttgart, 1989.

Tab. 1. Die in 7 Materialien erzeugten Nuklide und ihre Aktivitäts- und Dosiswerte (siehe Text). $1.6+5$ bedeutet $1.6 \cdot 10^5$.

Material	Nuklid	Relative Sättig.-aktivität	Aktiv.-Konz.-im Material (Bq/g)	Interne Dosis (mSv)	
				Effektive Dosis	Lungendosis
Al	22Na	0.49	1.6+5	4.4-4	4.8-4
	24Na	0.51	5.5+4	<u>2.2-5</u>	<u>7.9-5</u>
				4.6-4	5.6-4
Ti	46Sc	0.63	3.5+5	3.4-3	1.9-2
	47Sc	0.33	2.5+2	1.5-7	6.0-7
	48Sc	0.04	1.0+4	<u>1.3-5</u>	<u>3.4-5</u>
				3.4-3	1.9-2
Fe	46Sc	0.006	9.4+3	9.0-5	5.2-4
	48V	0.022	4.5+4	7.0-5	7.0-5
	51Cr	0.12	2.4+5	8.3-6	1.1-5
	54Mn	0.85	5.5+5	9.2-4	7.9-4
	55Fe	19.0	4.2+6	<u>3.7-3</u>	<u>2.6-3</u>
4.6-3				4.0-3	
Cu	46Sc	0.002	8.0+3	7.7-5	4.4-4
	48V	0.002	1.0+4	1.6-5	1.6-5
	51Cr	0.010	5.2+4	1.8-6	2.4-6
	54Mn	0.017	2.7+4	4.5-5	3.9-5
	59Fe	0.004	2.0+4	9.6-5	8.4-5
	56Co	0.008	3.3+4	2.4-4	1.1-3
	57Co	0.035	6.4+4	5.4-5	3.1-4
	58Co	0.10	4.3+5	8.8-4	4.1-3
	60Co	0.087	2.5+4	2.7-4	1.1-3
	63Ni	0.062	9.7+2	9.8-7	1.0-6
	64Cu	0.73	8.2+4	<u>5.2-6</u>	<u>2.0-5</u>
1.7-3				7.2-3	
Pb	185Os	0.0006	2.4+3	8.1-6	5.8-6
	201Tl	0.026	8.4+4	6.3-6	1.7-5
	202Tl	0.003	1.6+4	5.2-6	6.5-6
	204Tl	0.028	1.3+4	1.0-5	1.7-5
	203Pb	0.97	2.3+6	3.9-4	5.8-4
	206Bi	0.0004	1.8+3	<u>2.2-6</u>	<u>2.1-6</u>
4.0-4				6.3-4	

Fortsetzung nächste Seite

Tab. 1. Fortsetzung

Material	Nuklid	Relative Sättig.-aktivität	Aktiv.-Konz.-im Material (Bq/g)	Interne Dosis (mSv)	
				Effektive Dosis	Lungen-dosis
Messing	51Cr	0.005	1.6+4	6.6-7	4.6-7
	54Mn	0.008	7.8+3	1.6-5	1.3-5
	56Co	0.004	9.8+3	8.6-5	4.0-4
	57Co	0.014	1.5+4	1.5-5	8.9-5
	58Co	0.033	8.4+5	2.2-4	1.0-3
	60Co	0.039	7.1+3	9.1-5	3.6-4
	63Ni	0.028	2.7+2	3.3-7	3.4-7
	65Zn	0.55	6.5+5	5.1-3	2.0-2
	64Cu	0.31	2.1+4	1.6-6	6.0-6
	67Cu	0.035	5.4+4	<u>1.4-5</u> 5.6-3	<u>3.6-5</u> 2.2-2
Stahl	46Sc	0.007	1.6+4	1.5-4	8.8-4
	48V	0.008	2.4+4	3.7-5	3.7-5
	51Cr	0.32	9.6+5	3.3-5	4.4-5
	54Mn	0.27	2.5+5	4.2-4	3.6-4
	55Fe	6.0	2.0+6	1.7-3	1.2-3
	56Co	0.018	4.2+4	3.0-4	1.4-3
	57Co	0.25	2.6+5	2.2-4	1.3-3
	58Co	0.042	1.0+5	2.0-4	9.5-4
	60Co	0.085	1.5+4	<u>1.6-4</u> 3.2-3	<u>6.5-4</u> 6.8-3

Tab. 2 Verhältnis R von interner Dosis (effektive Dosis und Lungendosis) zu externer Dosis (siehe Text), jeweils normiert auf die maximal zulässige Jahresdosis.

Material	R			
	Mech. Trennen Eff. Dosis	Lungendosis	Trennschweißen Eff. Dosis	Lungendosis
Al	0.020	0.008	0.16	0.063
Ti	0.14	0.27	1.2	2.1
Fe	0.20	0.057	1.6	0.45
Cu	0.072	0.10	0.58	0.81
Pb	0.017	0.009	0.14	0.071
Messing	0.24	0.31	1.9	2.5
Stahl	0.14	0.10	1.1	0.77

Abbildung 1.

Externe Dosisleistung als Funktion der Abklingzeit für 7 aktivierte Materialien.

a) Aktivierungszeit $t_1 = 500$ d.

b) Aktivierungszeit $t_1 = 50$ d.

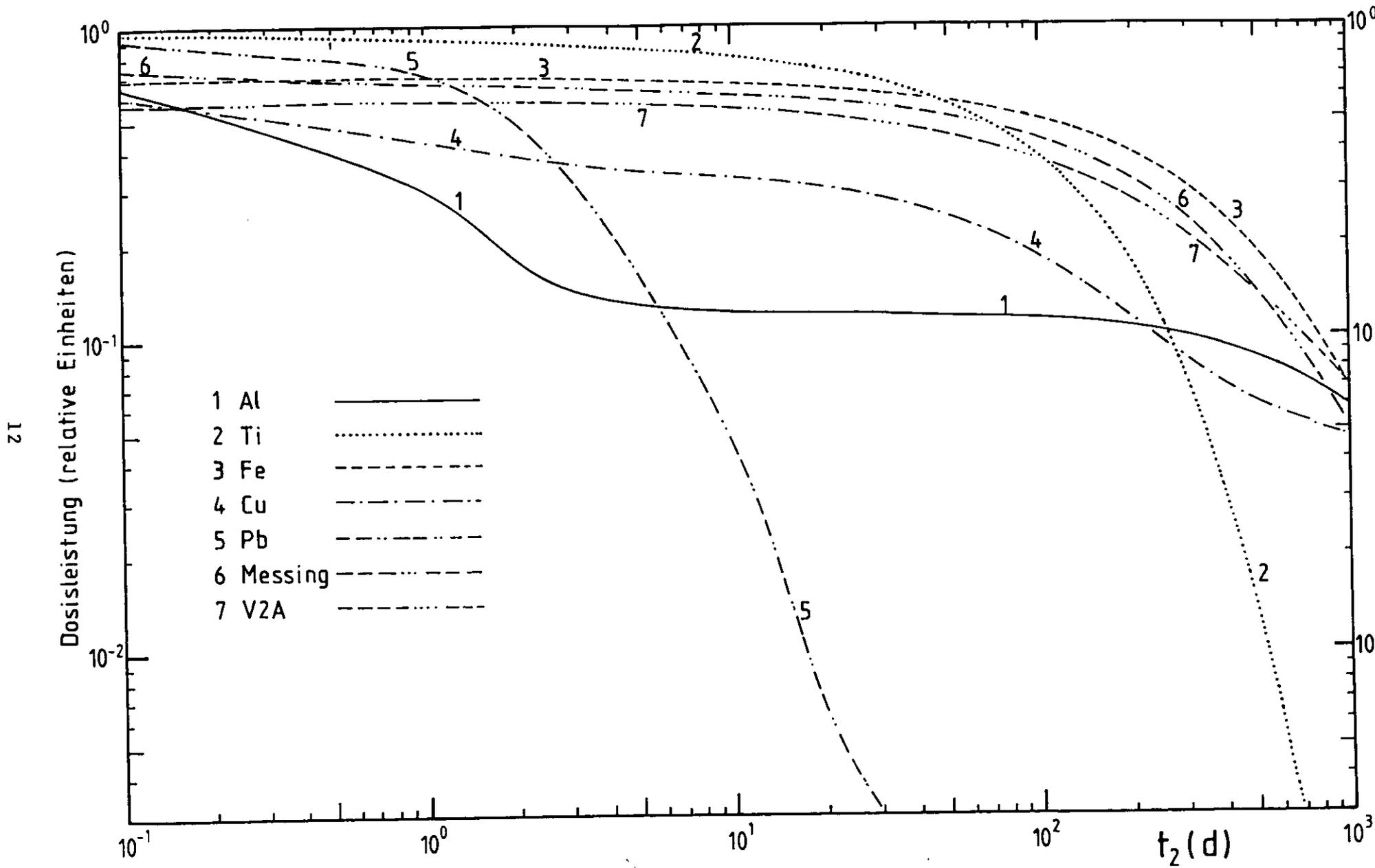


Abb. 1a

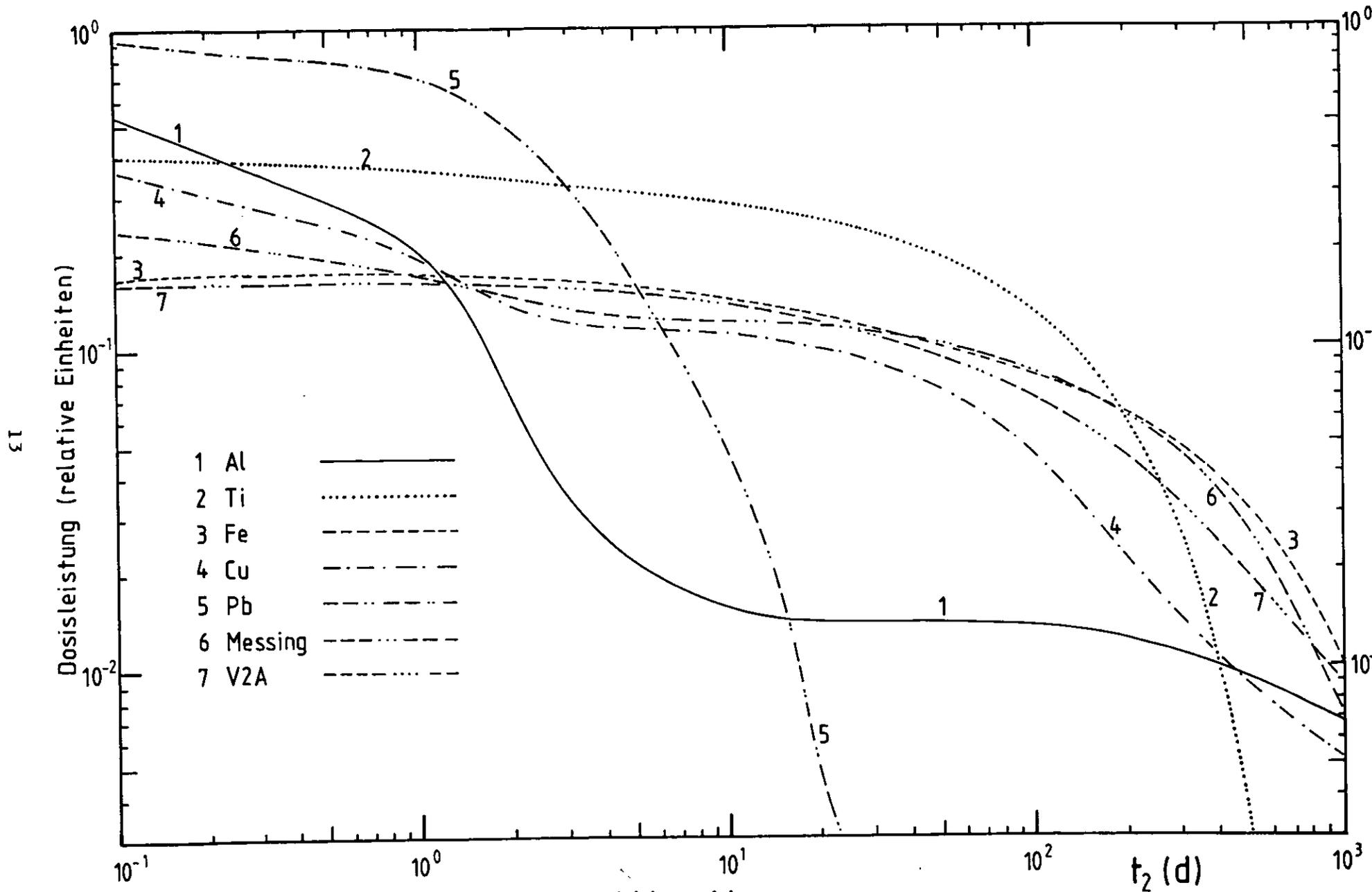


Abb. 1 b

