

**HEIM-SCHUMACHER-FROST**  
**RADIOAKTIVE ISOTOPE IN DER CHIRURGIE**



# **RADIOAKTIVE ISOTOPE IN DER CHIRURGIE**

von

**Dr. med. WILHELM HEIM**

Professor an der Freien Universität Berlin,  
Ärztlicher Direktor und Chefarzt der Chirurgischen Abteilung  
des Städtischen Rudolf-Virchow-Krankenhauses Berlin-West

**Dr. med. WERNER SCHUMACHER**

Chefarzt der Abteilung  
für Strahlentherapie und Nuklearmedizin  
des Städtischen Rudolf-Virchow-Krankenhauses Berlin-West

**Dr.-Ing. DIETRICH FROST**

Leiter der Abteilung für Strahlungsphysik  
des Städtischen Rudolf-Virchow-Krankenhauses Berlin-West

Mit 180 Abbildungen

**WALTER DE GRUYTER & CO.**

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung  
Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.

**BERLIN 1961**





Copyright 1961 by Walter de Gruyter & Co., vormals G.J. Göschen'sche Verlagshandlung — J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp., Berlin W30, Genthiner Str. 13 — Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe, der Herstellung von Mikrofilmen und der Übersetzung, vorbehalten. — Printed in Germany. — Archiv-Nr. 518461.

Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin W30

## Vorwort

Es ist erst ein halbes Jahrhundert her, seitdem die Entdeckungen des großen Physikers W.C. RÖNTGEN der medizinischen Wissenschaft neue und wichtige Erkenntnisse vermittelt haben. Damals ergaben sich für die Medizin unmittelbar mannigfache Nutzenanwendungen dieser „neuen Art von Strahlen“.

In kurzer Folge kamen dann die Entdeckungen von H. BECQUEREL und dem Ehepaar P. und M. CURIE, die eine ähnliche Strahlung im natürlichen Uran nachweisen konnten. Alle diese Entdeckungen schufen die Voraussetzung für die Kernreaktoren, die mit der Atomexplosion in Hiroshima das Atomzeitalter einleiteten.

Diese neue Waffe gegen den Menschen brachte auch friedfertige Vorteile. So ermöglichte sie die Technik der Reaktoren und schuf Verfahren, Elemente durch eine so kurzlebige Strahlung zu kennzeichnen, daß sie auch in der Medizin anwendbar wurden.

Diese künstlichen radioaktiven Isotope erwiesen sich inzwischen ebenso segensreich im Dienste der Medizin, wie es die Röntgenstrahlen sind. Das Gebiet der Kernphysik hat neben der Bedeutung auf allen Zweigen der Wissenschaft und der Wirtschaft auch für die Medizin eine weittragende Bedeutung erhalten.

Durch die Verwendung von radioaktiven Isotopen ist erstmalig die Möglichkeit gegeben, einen Einblick in die Funktionsabläufe im Organismus durch Messungen außerhalb des Körpers zu erhalten.

Nach Verabreichung spezifischer radioaktiver Isotope können der Stoffwechsel in den verschiedenen Organen, der Kreislauf, die Regeneration der Gewebe sowie viele andere physiologische Vorgänge im zeitlichen Ablauf von außen mittels geeigneter Apparate nahezu mathematisch exakt kennengelernt und festgestellt werden. Ohne die Hilfe der künstlichen radioaktiven Isotope wären viele Erkenntnisse auf dem Gebiet der Medizin nicht möglich gewesen.

Damit ist es auch für den Arzt und insbesondere für jeden operativ tätigen Kliniker notwendig, die grundlegenden Kenntnisse physikalischer Art, soweit sie für ihn eine praktische Bedeutung haben, zu beherrschen. Aus der zunehmenden Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen, aus den physikalischen Lehrbüchern und selbst aus den Handbüchern über künstliche radioaktive Isotope ist es für den Kliniker jedoch unmöglich, in Kürze die sichere klinisch brauchbare Routinemethode herauszufinden, die ihm für die Diagnostik und Therapie im Bereich der Chirurgie

von Bedeutung ist. Das Gebiet ist bereits zu umfangreich geworden. Die Besonderheit der Nuklearmedizin verlangt daher eine kurze Beschreibung der üblichen klinisch brauchbaren Untersuchungs- und Behandlungsmethoden.

In gemeinsamer Arbeit haben der Physiker, der Strahlentherapeut und der chirurgisch tätige Kliniker ihre in jahrelangen gemeinsamen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse niedergelegt. Da für den Kliniker eine Beschreibung der verschiedenen Variationen der Untersuchungsmethoden weniger wichtig ist, wurde hier besonders Wert darauf gelegt, nur klinisch bewährte Methoden zu beschreiben. Aus der eigenen Erfahrung auf diesem Gebiet wurde besonders das Verfahren ausgewählt, das bei der üblichen Technik die genauesten Ergebnisse lieferte.

Im *allgemeinen* Teil wurde eine Grundlage für das physikalische und technische Rüstzeug geschaffen. Die verschiedenen physikalischen Daten der Strahlung und Energie leiten über zu den Eigenschaften der radioaktiven Isotope. Die notwendigen Begriffe sowohl der Dosierung wie auch der gebräuchlichen Namen werden, soweit es für die chirurgischen Belange notwendig ist, im einzelnen abgehandelt. Sodann werden die für den klinischen Betrieb bewährten Meßgeräte eingehend geschildert. Statistische Daten und Beispiele aus der Praxis sollen dem Kliniker ein Fundament geben und ihm die Untersuchungs- und Behandlungsmethoden ohne eine besondere Schulung auf diesem Gebiet ermöglichen. Die Literaturhinweise vermitteln demjenigen, der für bestimmte Untersuchungen eine tiefer gehende Information benötigt, die entsprechenden Arbeiten zu finden. Auf die im Fluß befindliche wissenschaftliche Forschung wird nur kurz hingewiesen. Für die bewährten Routinemethoden wurden nur solche Geräte beschrieben, die bei uns in den letzten Jahren verwendet oder entwickelt wurden und die sich als nützlich erwiesen haben.

Der Umgang mit radioaktiven Stoffen erfordert darüber hinaus spezielle Kenntnisse auf dem Gebiet des Strahlenschutzes, die, soweit sie für den Arzt, das Pflegepersonal und den Patienten wichtig sind, hier wiedergegeben wurden.

Im *klinischen* Teil wird das weite Anwendungsgebiet der radioaktiven Isotope zunächst unter Berücksichtigung neuer Erfahrungen auf dem Gebiete der Physik, der Physiologie und der Pathologie veranschaulicht. Innerhalb der Therapie sind hinsichtlich der Methodik ebenfalls wie im Kapitel Diagnostik nur die Verfahren angeführt worden, die für den Patienten entweder in Kombination mit operativen Verfahren oder für sich allein nützlicher als andere konservative Methoden erwiesen haben.

Neben eigenen Methoden wurden auch die Ergebnisse ausländischer Kliniker herangezogen, vornehmlich in den Kapiteln, in denen unsere eigenen Erfahrungen nicht umfangreich genug erschienen.

In jedem Kapitel wird in der Diskussion und der Auswertung eigener Ergebnisse kritisch auf die immer noch bestehende Problematik hingewiesen. Gegenüber anderen Autoren sind wir der Ansicht, daß die Verwendung radioaktiver Isotope einen unbestrittenen Wert auch für die Durchführung von Operationen besitzt.

Besonders auf dem Gebiet der Schilddrüsenerkrankung hat die Anwendung von radioaktivem Jod eine besondere Bedeutung erlangt.

Der Begriff der funktionskritischen Operation wurde erst durch die Anwendung der neuen radioaktiven Isotope geschaffen.

Wir stehen zwar erst am Anfang einer Entwicklung, die bereits für die gesamte Medizin wesentliche Fortschritte gebracht hat. Die Erfolge berechtigen uns zu der Hoffnung, daß weitere grundlegende Erkenntnisse besonders auf dem Gebiet der Chirurgie in Diagnostik und Therapie möglich sind.

Berlin, im Januar 1961

*Wilhelm Heim*



# Inhaltsverzeichnis

## Teil I: Physikalischer Teil

von DIETRICH FROST

|                                                               | Seite |
|---------------------------------------------------------------|-------|
| A. Grundbegriffe zum Verständnis der Radioaktivität . . . . . | 1     |
| 1. Natürliche und künstliche radioaktive Elemente . . . . .   | 1     |
| 2. Die verschiedenen Zerfallsarten . . . . .                  | 2     |
| a) Alphastrahlung . . . . .                                   | 2     |
| b) Betastrahlung . . . . .                                    | 2     |
| c) Positronenstrahlung . . . . .                              | 3     |
| d) K-Strahlung . . . . .                                      | 3     |
| 3. Eigenschaften radioaktiver Isotope . . . . .               | 3     |
| a) Zerfallskonstante und Halbwertszeit . . . . .              | 3     |
| 4. Radioaktive Mengeneinheit . . . . .                        | 5     |
| 5. Dosisbegriffe . . . . .                                    | 5     |
| a) Ionendosis . . . . .                                       | 5     |
| b) Ionendosisleistung . . . . .                               | 5     |
| c) Energiedosis . . . . .                                     | 6     |
| d) Energiedosisleistung . . . . .                             | 6     |
| e) Dosiskonstante von Gammastrahlern . . . . .                | 6     |
| f) Gewebsdosis . . . . .                                      | 7     |
| g) Erläuterung zur Standard-Ionendosis . . . . .              | 8     |
| 6. Praktische Daten . . . . .                                 | 8     |
| B. Die klinisch verwendeten Strahlungsmeßgeräte . . . . .     | 32    |
| 1. Ionisationskammer und Zählrohr . . . . .                   | 32    |
| a) Zählrohrcharakteristik . . . . .                           | 34    |
| b) Auflösungsvermögen . . . . .                               | 35    |
| c) Gamma- und Betazählrohre . . . . .                         | 35    |
| 2. Der Szintillationszähler . . . . .                         | 37    |
| a) Wirkungsweise — Aufbau . . . . .                           | 37    |
| b) Die verschiedenen Szintillatoren . . . . .                 | 38    |
| c) Gammaspektroskopie . . . . .                               | 40    |
| d) Nulleffekt und Abschirmung . . . . .                       | 41    |
| 3. Impulsverstärker und Anzeigeräte . . . . .                 | 42    |
| 4. Scintiscanner . . . . .                                    | 44    |
| 5. Statistische Meßfehler . . . . .                           | 46    |
| 6. Praktische Tabellen zum Strahlenschutz . . . . .           | 48    |

## Teil II: Klinischer Teil

von WILHELM HEIM und WERNER SCHUMACHER

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| A. Die biologische Strahlenwirkung . . . . .               | 69 |
| 1. Die Theorien der biologischen Strahlenwirkung . . . . . | 69 |
| 2. Strahlendosis und Strahlenwirkung . . . . .             | 71 |

|                                                                                             | Seite  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3. Die zytologischen Bestrahlungswirkungen . . . . .                                        | 73     |
| a) Zytologische Veränderungen bei Anwendung radioaktiver Isotope . . . . .                  | 75     |
| b) Die genetischen Strahlenwirkungen . . . . .                                              | 75     |
| 4. Die Strahlenchemie . . . . .                                                             | 77     |
| a) Die Strahlenchemie des Wassers . . . . .                                                 | 79     |
| b) Die Wirkung der Strahlung auf Kolloide . . . . .                                         | 79     |
| c) Die Strahlungswirkung auf Makromoleküle . . . . .                                        | 80     |
| d) Die Strahlungswirkung auf Proteine . . . . .                                             | 81     |
| e) Die Inaktivierung von Enzymen . . . . .                                                  | 81     |
| f) Die Reaktion auf die Nukleinsäuren . . . . .                                             | 82     |
| 5. Die Strahlenwirkung auf biologische Gewebe . . . . .                                     | 82     |
| 6. Organspezifische Strahlenwirkungen . . . . .                                             | 83     |
| a) Die Strahlenwirkung auf die Haut . . . . .                                               | 84     |
| b) Die Wirkung auf die blutbildenden Organe . . . . .                                       | 85     |
| c) Die Strahlenwirkung auf das periphere Blut . . . . .                                     | 86     |
| d) Die Strahlenwirkung auf die Knochen . . . . .                                            | 86     |
| e) Die Wirkung auf den Gastrointestinaltrakt . . . . .                                      | 87     |
| 7. Die Wirkung verschiedener Strahlenarten . . . . .                                        | 87     |
| 8. Die Auswahl radioaktiver Isotope für Diagnostik und Therapie . . . . .                   | 87     |
| 9. Die Dosisprobleme bei der therapeutischen Anwendung radioaktiver Isotope . . . . .       | 88     |
| a) Die Dosisberechnungen . . . . .                                                          | 89     |
| b) Protrahierung und Fraktionierung . . . . .                                               | 90     |
| c) Organspezifische strahlende Substanzen und ihre Eigenschaften . . . . .                  | 91     |
| d) Die räumliche und zeitliche Verteilung der radioaktiven Strahler im Organismus . . . . . | 91     |
| <br>B. Die Chirurgie der Schilddrüsenerkrankungen . . . . .                                 | <br>92 |
| 1. Die Indikation zur Operation . . . . .                                                   | 94     |
| a) Voruntersuchungen . . . . .                                                              | 94     |
| b) Radiojod in der Diagnostik der Schilddrüsenerkrankungen . . . . .                        | 95     |
| 2. Die Physiologie des Jodstoffwechsels . . . . .                                           | 96     |
| a) Der Radiojodtest . . . . .                                                               | 98     |
| Durchführung . . . . .                                                                      | 99     |
| Auswertung . . . . .                                                                        | 101    |
| b) Die Serumjod- und Proteinjodbestimmung . . . . .                                         | 102    |
| Methodik . . . . .                                                                          | 102    |
| Durchführung . . . . .                                                                      | 102    |
| Ausrechnung . . . . .                                                                       | 103    |
| Beispiel . . . . .                                                                          | 103    |
| c) Das Clearance-Verfahren . . . . .                                                        | 104    |
| Methodik . . . . .                                                                          | 105    |
| Durchführung . . . . .                                                                      | 105    |
| Beispiel zur Berechnung der J-131-Clearance . . . . .                                       | 106    |
| Auswertung . . . . .                                                                        | 107    |
| Auswertung aller Befunde . . . . .                                                          | 108    |
| α) Normale Schilddrüsenfunktion . . . . .                                                   | 108    |
| β) Hyperthyreose . . . . .                                                                  | 110    |
| γ) Struma diffusa euthyreotica . . . . .                                                    | 111    |
| δ) Struma nodosa euthyreotica mit funktionsuntüchtigen Knoten . . . . .                     | 112    |
| ε) Strumitis . . . . .                                                                      | 112    |
| ζ) Unterfunktion oder Blockierung der Schilddrüse . . . . .                                 | 113    |
| η) Myxödem oder Blockierung der Schilddrüse . . . . .                                       | 113    |

|                                                                               | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|
| d) Fehlermöglichkeiten des Radiojodtestes . . . . .                           | 113   |
| Durch Verabreichung von Jod . . . . .                                         | 113   |
| Durch Thyreostatika . . . . .                                                 | 116   |
| Durch Schilddrüsenextrakt oder Schilddrüsenhormon . . . . .                   | 116   |
| Durch andere schilddrüsenwirksame Medikamente . . . . .                       | 116   |
| 3. Die Lokalisation der Schilddrüsenfunktion . . . . .                        | 116   |
| a) Technik der Lokalisierung . . . . .                                        | 116   |
| b) Methodik . . . . .                                                         | 117   |
| 4. Die Feststellung dystopischer Schilddrüsenewebe . . . . .                  | 127   |
| 5. Andere Untersuchungsmethoden . . . . .                                     | 131   |
| a) Die Röntgenaufnahmen des Ösophagus und der Trachea . . . . .               | 131   |
| b) Die HNO-Untersuchung . . . . .                                             | 132   |
| c) Die EKG-Untersuchung . . . . .                                             | 132   |
| d) Die chemische Bestimmung des eiweißgebundenen Plasmajods . . . . .         | 133   |
| e) Die Messung des Exophthalmus mit Hilfe des Exophthalmometers . . . . .     | 133   |
| 6. Die Kropfoperation auf Grund der neuen Erkenntnisse . . . . .              | 134   |
| a) Die Therapie der struma diffusa euthyreotica . . . . .                     | 134   |
| Hinweise für die Operation . . . . .                                          | 136   |
| b) Die Operation der struma nodosa et cystica euthyreotica . . . . .          | 137   |
| Hinweis für die Operation . . . . .                                           | 139   |
| c) Die Adoleszenten-Struma . . . . .                                          | 139   |
| Hinweis . . . . .                                                             | 139   |
| d) Die Struma diffusa hyperthyreotica (Basedow-Struma) . . . . .              | 140   |
| Hinweis für die Operation . . . . .                                           | 141   |
| e) Das toxische Adenom . . . . .                                              | 142   |
| Hinweise für die Operation . . . . .                                          | 143   |
| f) Die Therapie der dystopen Struma . . . . .                                 | 143   |
| 7. Die chirurgisch-radiologische Therapie des Schilddrüsenkarzinoms . . . . . | 146   |
| Hinweis für die Operation . . . . .                                           | 147   |
| 8. Nachuntersuchung . . . . .                                                 | 147   |
| a) Der Radiojodtest . . . . .                                                 | 147   |
| b) Das Scanningverfahren . . . . .                                            | 148   |
| C. Die Radiojodtherapie . . . . .                                             | 150   |
| 1. Indikation und Kontraindikation . . . . .                                  | 150   |
| 2. Durchführung . . . . .                                                     | 151   |
| 3. Beispiele der Radiojodtherapie . . . . .                                   | 152   |
| a) Die Struma diffusa hyperthyreotica . . . . .                               | 152   |
| b) Der Morbus Basedow . . . . .                                               | 154   |
| c) Die Struma euthyreotica . . . . .                                          | 155   |
| d) Die Behandlung des Schilddrüsenkarzinoms . . . . .                         | 155   |
| 4. Ergebnisse der Radiojodtherapie . . . . .                                  | 157   |
| D. Die Anwendung radioaktiver Isotope zur Leberdiagnostik . . . . .           | 159   |
| 1. Einleitung . . . . .                                                       | 159   |
| 2. Der Leberfunktionstest . . . . .                                           | 160   |
| a) Methodik . . . . .                                                         | 160   |
| b) Durchführung . . . . .                                                     | 160   |
| c) Der normale Funktionsablauf in der Leber . . . . .                         | 162   |
| 3. Methodik zur Darstellung der Leber . . . . .                               | 164   |
| a) Durchführung . . . . .                                                     | 165   |
| b) Das normale Leberbild . . . . .                                            | 165   |

|                                                                                            | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| c) Anomalien der Leber im Photogammagramm . . . . .                                        | 166   |
| d) Die Differentialdiagnostik von Zysten im Lebergebiet . . . . .                          | 166   |
| e) Das primäre Leberkarzinom . . . . .                                                     | 169   |
| f) Lebermetastasen . . . . .                                                               | 171   |
| Diffuse Lebermetastasen . . . . .                                                          | 172   |
| Grobknotige Lebermetastasen . . . . .                                                      | 174   |
| 4. Folgerungen für das operative Vorgehen . . . . .                                        | 177   |
| E. Die Tumordiagnostik mit radioaktiven Isotopen . . . . .                                 | 180   |
| 1. Hirntumorklassifikation . . . . .                                                       | 182   |
| A Die Darstellung der Hirntumoren durch Messungen von außen . . . . .                      | 182   |
| B Die Feststellung der Tumorausdehnung durch Sondenmessung während der Operation . . . . . | 185   |
| a) Methodik . . . . .                                                                      | 185   |
| b) Durchführung . . . . .                                                                  | 185   |
| 2. Die Lokalisierung des Brustkrebses einschließlich der Metastasen . . . . .              | 186   |
| 3. Die Diagnose und Lokalisierung von Melanomen und Hauttumoren mit P-32 . . . . .         | 187   |
| Methodik . . . . .                                                                         | 188   |
| F. Blutvolumen und Kreislaufdiagnostik . . . . .                                           | 189   |
| 1. Die Bestimmung des Blutvolumens und dessen Bedeutung für die Operation . . . . .        | 189   |
| Methodik . . . . .                                                                         | 191   |
| Durchführung . . . . .                                                                     | 191   |
| Beispiel . . . . .                                                                         | 193   |
| a) Die Markierung der Erythrozyten . . . . .                                               | 194   |
| b) Die Markierung mit Cr-51 . . . . .                                                      | 195   |
| Methodik . . . . .                                                                         | 195   |
| Durchführung . . . . .                                                                     | 195   |
| c) Die Markierung der Erythrozyten mit P-32 . . . . .                                      | 197   |
| Methodik . . . . .                                                                         | 197   |
| Durchführung . . . . .                                                                     | 197   |
| Auswertung . . . . .                                                                       | 198   |
| d) Der Isotopenhaematokrit . . . . .                                                       | 199   |
| e) Die Markierung der Erythrozyten mit radioaktivem Eisen . . . . .                        | 200   |
| f) Die Doppelmarkierungen des Blutes . . . . .                                             | 201   |
| G. Die Bestimmung der Kreislaufzeit . . . . .                                              | 202   |
| 1. Die Verwendung von markierten Erythrozyten . . . . .                                    | 203   |
| 2. Die Verwendung von markiertem, menschlichem Serumalbumin (J-131-HSA) . . . . .          | 204   |
| 3. Die Untersuchung der peripheren Durchblutungsstörungen . . . . .                        | 207   |
| a) Durchführung . . . . .                                                                  | 207   |
| b) Auswertung . . . . .                                                                    | 208   |
| 4. Die Prüfung der Gewebedurchblutung . . . . .                                            | 212   |
| 5. Die Untersuchung arterieller Durchblutungsstörungen . . . . .                           | 213   |
| 6. Die Organdurchblutung . . . . .                                                         | 214   |
| 7. Die Leberdurchblutung . . . . .                                                         | 214   |
| 8. Die Bestimmung des Herzminutenvolumens . . . . .                                        | 216   |
| a) Methodik . . . . .                                                                      | 219   |
| b) Technische Erläuterung . . . . .                                                        | 219   |
| c) Durchführung . . . . .                                                                  | 219   |
| d) Auswertung . . . . .                                                                    | 219   |

|                                                                                                                      | Seite |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 9. Die Radiokardiographie . . . . .                                                                                  | 221   |
| a) Methodik . . . . .                                                                                                | 222   |
| b) Durchführung . . . . .                                                                                            | 222   |
| c) Auswertung . . . . .                                                                                              | 222   |
| 10. Die selektive quantitative Radiokardiographie . . . . .                                                          | 225   |
| a) Das Herzminutenvolumen . . . . .                                                                                  | 225   |
| b) Die Entleerungsrate des rechten Ventrikels . . . . .                                                              | 226   |
| c) Das Blutvolumen des rechten Ventrikels . . . . .                                                                  | 226   |
| d) Die Entleerungsrate des linken Ventrikels . . . . .                                                               | 227   |
| e) Methodik . . . . .                                                                                                | 231   |
| f) Durchführung . . . . .                                                                                            | 231   |
| H. Der Schock — Untersuchungen und Ergebnisse mit radioaktiven Isotopen . . . . .                                    | 232   |
| 1. Der neurogene Schock . . . . .                                                                                    | 233   |
| 2. Der haemorrhagische Schock . . . . .                                                                              | 233   |
| I. Die Bestimmung der Lebensdauer der Erythrozyten . . . . .                                                         | 235   |
| 1. Methodik . . . . .                                                                                                | 236   |
| 2. Faktoren, die eine Markierung der Erythrozyten mit Cr-51 beeinflussen können . . . . .                            | 240   |
| K. Weitere Methoden der diagnostischen Anwendung radioaktiver Stoffe in der Chirurgie . . . . .                      | 241   |
| 1. Die Bestimmung der extrazellulären Raumes . . . . .                                                               | 241   |
| 2. Die Bestimmung des Gesamtkörperwassers . . . . .                                                                  | 243   |
| 3. Die Feststellung von Magen- und Darmblutungen . . . . .                                                           | 243   |
| 4. Frühzeitige Erkennung von Gefäßzerstörungen im Femurkopf bei Frakturen, die zur Femurkopfnekrose führen . . . . . | 244   |
| Methode . . . . .                                                                                                    | 245   |
| 5. Untersuchungen über den Knochenstoffwechsel . . . . .                                                             | 245   |
| Die Auswahl der radioaktiven Isotope für die Untersuchung des Knochenstoffwechsels . . . . .                         | 246   |
| 6. Die Bestimmung des Flüssigkeitsvolumens intrakavitärer Ergüsse und größerer Zysten . . . . .                      | 248   |
| a) Methodik . . . . .                                                                                                | 248   |
| b) Durchführung . . . . .                                                                                            | 249   |
| 7. Die Beurteilung der Nierenfunktion mit radioaktiv markierten Substanzen . . . . .                                 | 249   |
| a) Methode . . . . .                                                                                                 | 250   |
| b) Durchführung . . . . .                                                                                            | 250   |
| c) Auswertung . . . . .                                                                                              | 250   |
| 8. Diagnostische Untersuchungen mit Hilfe von markiertem Vitamin B-12 . . . . .                                      | 252   |
| a) Die verschiedenen Testmethoden . . . . .                                                                          | 253   |
| b) Methodik . . . . .                                                                                                | 254   |
| c) Durchführung . . . . .                                                                                            | 254   |
| Auswertung . . . . .                                                                                                 | 256   |
| d) Der Intrinsicfactor-Test . . . . .                                                                                | 256   |
| 9. Untersuchungen über die Fettverdauung und Fettresorption mit Hilfe radioaktiv markierter Fette . . . . .          | 257   |
| a) Methodik . . . . .                                                                                                | 258   |
| b) Durchführung . . . . .                                                                                            | 258   |
| c) Auswertung . . . . .                                                                                              | 259   |

|                                                                                                                                     | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| L. Die Tumorthherapie mit radioaktiven Isotopen unter chirurgischen Gesichtspunkten . .                                             | 260   |
| 1. Die Chirurgie des Schilddrüsenkarzinoms unter Berücksichtigung der Radiojodtherapie                                              | 260   |
| 2. Die Indikation zur Therapie . . . . .                                                                                            | 260   |
| 3. Die Radiojodaufnahme beim Schilddrüsenkarzinom . . . . .                                                                         | 261   |
| M. Die Therapie des Lungen- und Bronchialkarzinoms . . . . .                                                                        | 264   |
| 1. Die Verwendung von radioaktiven Kolloiden als präoperative Maßnahme bei der operativen Therapie der Bronchialkarzinome . . . . . | 264   |
| Methode . . . . .                                                                                                                   | 266   |
| 2. Die Anwendung radioaktiver Isotope als postoperative Maßnahme . . . . .                                                          | 267   |
| 3. Die Therapie des inoperablen Bronchialkarzinoms . . . . .                                                                        | 268   |
| A Die Anwendung von Kobalt-60-Perlen . . . . .                                                                                      | 268   |
| B Die Injektion von radioaktiven Kolloiden . . . . .                                                                                | 269   |
| a) Methode . . . . .                                                                                                                | 269   |
| b) Die Durchführung . . . . .                                                                                                       | 270   |
| c) Vorsichtsmaßnahmen . . . . .                                                                                                     | 270   |
| d) Kontrolle des Patienten . . . . .                                                                                                | 270   |
| C Die Implantation von radioaktiven Seeds . . . . .                                                                                 | 271   |
| D Die Infusion von Radiogold in die tumorösen Lungenlappen mit Hilfe eines Herzkatheters . . . . .                                  | 275   |
| N. Die Therapie der Pleura- und Peritonealkarzinose . . . . .                                                                       | 276   |
| 1. Die Indikationsstellung . . . . .                                                                                                | 277   |
| 2. Die Dosierung . . . . .                                                                                                          | 277   |
| 3. Methodik . . . . .                                                                                                               | 278   |
| 4. Durchführung . . . . .                                                                                                           | 278   |
| 5. Nebenreaktionen und Ergebnisse . . . . .                                                                                         | 280   |
| 6. Ergebnisse von Verteilungsuntersuchungen nach intrakavitärer Infusion von radioaktiven Kolloiden . . . . .                       | 282   |
| O. Die Therapie der Blasen Tumoren . . . . .                                                                                        | 285   |
| 1. Die Therapie der diffusen malignen Papillomatose . . . . .                                                                       | 286   |
| a) Methode . . . . .                                                                                                                | 286   |
| b) Die Verwendung eines Gummiballons . . . . .                                                                                      | 286   |
| c) Die Dosimetrie . . . . .                                                                                                         | 287   |
| d) Die intrakavitäre Blasen Therapie ohne Verwendung eines Gummiballons . . . .                                                     | 287   |
| e) Ergebnisse . . . . .                                                                                                             | 289   |
| 2. Die Therapie der rezidivierenden lokalisierten Papillomatose . . . . .                                                           | 289   |
| 3. Die Therapie der begrenzten Papillomatose mit Verdacht auf beginnende karzinomatöse Umwandlung . . . . .                         | 291   |
| 4. Die Nachbestrahlung nach unvollständiger Tumorexstirpation . . . . .                                                             | 294   |
| 5. Die Therapie der schwer zugänglichen Tumoren am Blasenboden oder im Bereich der Ostien . . . . .                                 | 294   |
| 6. Die Therapie des infiltrierenden Blasenkarzinoms . . . . .                                                                       | 294   |
| P. Die Therapie des Prostatakarzinoms . . . . .                                                                                     | 295   |
| 1. Das radioaktive Material . . . . .                                                                                               | 297   |
| 2. Dosierung . . . . .                                                                                                              | 297   |
| 3. Die apparative Ausrüstung . . . . .                                                                                              | 298   |
| 4. Die suprapubische Technik . . . . .                                                                                              | 298   |
| 5. Die perineale Methode . . . . .                                                                                                  | 300   |
| Durchführung . . . . .                                                                                                              | 300   |
| 6. Die transrektale Methode . . . . .                                                                                               | 301   |
| 7. Ergebnisse . . . . .                                                                                                             | 302   |

|                                                                                     | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Q. Die Therapie des Portiokarzinoms . . . . .                                       | 303   |
| 1. Die Indikation zur Radiogold-Therapie . . . . .                                  | 305   |
| 2. Methode . . . . .                                                                | 306   |
| 3. Spezieller Strahlenschutz . . . . .                                              | 306   |
| 4. Die Dosierung . . . . .                                                          | 307   |
| 5. Die Kontrollmaßnahmen . . . . .                                                  | 308   |
| Ergebnisse . . . . .                                                                | 308   |
| R. Die Hypophysenausschaltung bei fortgeschrittenen malignen Tumoren mit Metastasen | 309   |
| 1. Methode . . . . .                                                                | 311   |
| 2. Durchführung . . . . .                                                           | 312   |
| 3. Dosierung . . . . .                                                              | 315   |
| S. Die Radiogold-Therapie leicht zugänglicher Tumoren . . . . .                     | 317   |
| 1. Die Radiogold-Therapie der Tumoren im Mund- und Kiefergebiet . . . . .           | 319   |
| 2. Die Therapie des Zungenkarzinoms . . . . .                                       | 321   |
| 3. Die Therapie der Tumoren des harten Gaumens . . . . .                            | 323   |
| 4. Die Therapie des Tonsillenkarzinoms . . . . .                                    | 323   |
| 5. Die Therapie des Epipharynx-Tumors . . . . .                                     | 324   |
| 6. Die Radiogold-Therapie der Larynxtumoren . . . . .                               | 325   |
| Literaturverzeichnis . . . . .                                                      | 329   |
| Autorenregister . . . . .                                                           | 383   |
| Sachregister . . . . .                                                              | 387   |
| Berichtigungen . . . . .                                                            | 395   |



## Teil I: Physikalischer Teil

Die klinische Anwendung von radioaktiven Isotopen stellt den Arzt vor die Notwendigkeit, sich mit rein physikalischen Gedankengängen sowie mit der kernphysikalischen Meßtechnik vertraut zu machen. Durch die stürmische Entwicklung auf dem Gebiete der Kernphysik ist heute bereits ein außerordentlich umfangreiches Schrifttum entstanden, das es dem Mediziner schwer macht, das für seine Untersuchungen Notwendige herauszuschälen.

Für die Abfassung des physikalischen Teils eines medizinischen Lehrbuches stehen zwei grundsätzliche Wege offen. Der erste und eigentlich am häufigsten beschrittene Weg ist die qualitative und relativ oberflächliche Schilderung der einzelnen Prinzipien. Die in diesem knapp bemessenen Kapitel vermittelten Grundlagen reichen in den seltensten Fällen aus, um die in den nachstehenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen selbst auszuführen. In der letzten Zeit sind nun in Deutschland eine Reihe von guten Einführungen in die kernphysikalische Meßtechnik erschienen. Diese sind am Schluß dieses Kapitels genannt und seien zum Studium empfohlen.

Für das vorliegende Buch wurde der zweite Weg zur Abfassung des physikalischen Teils gewählt, nämlich in knapper Form durch Tabellen und Diagramme Arbeitsunterlagen zu erstellen. Nach Erlernung der grundlegenden Meßmethodik mit Hilfe eines der genannten Einführungswerke steht dem Leser in diesem Teil des Buches eine Reihe von Arbeitsunterlagen zur Verfügung, die eine Beschaffung von weiterer Spezialliteratur entbehrlich macht. Dem Titel des Buches entsprechend werden diejenigen Meßmethoden bevorzugt dargestellt, die für den Chirurgen von besonderem Interesse sind.

### A. Grundbegriffe zum Verständnis der Radioaktivität

#### 1. Natürliche und künstliche radioaktive Elemente

Ein Atomkern läßt sich symbolisch durch die Massenzahl  $A$  und die Ordnungszahl  $Z$  kennzeichnen. Dabei wird  $A$  als oberer Index an das Chemische Symbol des Elements und die Ordnungszahl  $Z$  als unterer Index angeschrieben. Die Kernladungs- oder Ordnungszahl sei als bekannt vorausgesetzt, so daß auf ihre Angabe häufig verzichtet werden kann. Nach dieser Bezeichnung gilt z. B. für

|                       |                                                           |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|
| einen Sauerstoffkern  | die Schreibweise ${}^8\text{O}^{16}$ oder $\text{O}^{16}$ |
| einen Wasserstoffkern | die Schreibweise ${}^1\text{H}^1$ oder $\text{H}^1$       |
| ein Proton            | die Schreibweise ${}^1\text{p}^1$ oder $\text{p}^1$       |
| ein Neutron           | die Schreibweise ${}^0\text{n}^1$ oder $\text{n}^1$       |

Als Isotope bezeichnet man allgemein Stoffe, die sich bei gleicher Ordnungszahl durch verschiedene Neutronenzahlen unterscheiden.

Die schwersten Elemente des natürlichen periodischen Systems der Elemente erleiden einen dauernden Umwandlungsprozeß. Diese spontanen Zerfallsvorgänge wandeln eine Atomart in eine andere um. Die Zahl dieser Umwandlungen kann eine ganze Reihe von Elementen durchlaufen, bis sie mit einem stabilen Isotop ihr Ende findet. Bei jeder der genannten Atomumwandlungen wird ein gewisser Energiebetrag frei. Diese Energie wird in Form von korpuskularer Strahlung, z. T. begleitet durch Quantenstrahlung, abgestrahlt.

Wir kennen vier radioaktive Zerfallsreihen:

Die Thorium-Reihe  
 Die Neptunium-Reihe  
 Die Uran-Radium-Reihe  
 Die Uran-Aktinium-Reihe

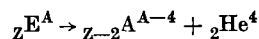
Im Gegensatz zu den lange bekannten, natürlich radioaktiven Kernen kennen wir heute rund 1000 verschiedene, in der Natur nicht vorhandene instabile Atomarten. Sie können durch äußere Einwirkung mit Hilfe von Kernreaktionen erzeugt werden. Bei diesen künstlich radioaktiven Kernen oder Radioisotopen handelt es sich um strahlende Kernarten von Elementen, die in der Natur meist nur stabile Isotope besitzen. Der Zerfall von künstlich radioaktiven Isotopen erfolgt hauptsächlich unter Emission von Elektronen ( $\beta^-$ ), seltener von Positronen ( $\beta^+$ ), nicht so häufig auch durch Elektroneneinfang (K-Strahlung). Nur in seltensten Fällen läßt sich bei Radioisotopen eine  $\alpha$ -Emission beobachten.

## 2. Die verschiedenen Zerfallsarten

### a) Alphastrahlung

Als Alphastrahlung werden die beim Zerfallsakt emittierten Helium-Atomkerne  ${}_2\text{He}^4$  bezeichnet. Bei der Emission eines Alpha-Teilchens wird der Kern um 4 Masseneinheiten und 2 Ladungseinheiten verringert. Nach dem Verschiebungssatz von Fajans rückt daher der Kern um 2 Stellen nach links in periodischem System.

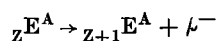
Charakteristisch für den Alpha-Zerfall ist die Gleichung:



Die Alpha-Teilchen eines bestimmten radioaktiven Isotops haben alle die gleiche Reichweite. Bezüglich der medizinischen Anwendung haben Alpha-Strahler heute nur noch eine untergeordnete Bedeutung.

### b) Betastrahlung

Die Emission von Kernelektronen wird als Betastrahlung bezeichnet. Symbolisch können wir schreiben:



Der entstehende Kern rückt im periodischen System um eine Stelle nach rechts. Im Gegensatz zum Alpha-Zerfall ergibt der Beta-Prozeß ein kontinuierliches Energiespektrum. Der Übergang eines Atomkerns in einen Folgekern unter  $\beta^-$ -Emission ist aus Gründen der Energiebilanz häufig von einer Gamma-Strahlung begleitet. Die

Energie dieser quantenhaften Gamma-Strahlung entspricht dabei dem Betrag der überschüssigen Anregungsenergie des Folgekernes.

### c) Positronenstrahlung

Eine Anzahl künstlich radioaktiver Isotope sendet eine Strahlung aus, die von derjenigen der natürlichen Strahler verschieden ist. Die bei diesem sog.  $\beta^+$ -Zerfall entstehende Positronenstrahlung besteht aus positiven Elektronen, die in Gegenwart von Materie nur kurzzeitig frei existieren können. Bei der Vereinigung eines Positrons mit einem negativen Elektron wird das „Elektronenpaar“ vernichtet und wandelt sich nach der Äquivalenzgleichung in zwei Gammaquanten um. Dieser Umkehrungsprozeß zur Paarbildung läuft nur bei Überschußenergien von mehr als 1 MeV ab.

### d) K-Strahlung

Bei Kernen, deren Instabilität auf einer zu großen Protonenzahl beruht, besteht die Möglichkeit, daß der Kern nicht unter Positronenemission zerfällt, sondern umgekehrt ein Elektron einfängt. Dieses Elektron wird vorzugsweise der kernnächsten, der K-Schale entnommen. Beim Übergang eines kernferneren Elektrons in die Elektronenlücke der K-Schale wird dann die jeweilige Röntgen-K-Strahlung emittiert. Durch Bahnelektroneneinfang wandeln sich fast alle schweren, instabilen Kerne mit einem Protonenüberschuß in stabile Isotope um.

## 3. Eigenschaften radioaktiver Isotope

### a) Zerfallskonstante und Halbwertszeit

Als Aktivität  $A$  eines radioaktiven Strahlers bezeichnet man die pro Zeiteinheit in ihm ablaufenden Zerfallsvorgänge. Sie ist der jeweiligen Zahl  $N$  der Atome direkt proportional:

$$A = - \frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1)$$

Darin ist  $\lambda$  die Zerfallskonstante.

Die Anzahl der Atome des Ausgangsstoffes zur Zeit  $t = 0$  sei  $N_0$ , dann ist die Anzahl zur Zeit  $t$ :

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Für eine Abklingung von  $N$  auf  $\frac{N_0}{2}$  ergibt sich die sog. Halbwertszeit zu

$$T = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln 2 = \frac{0.6931}{\lambda} \quad (3)$$

Dann kann Gleichung (2) auch geschrieben werden:

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T} t} \quad (4)$$

$e^{-\lambda t}$  als Funktion von  $t/T$  ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1. Zerfallsfunktion

[1]

| $t/T$ | $e^{-\lambda t}$ | $t/T$ | $e^{-\lambda t}$ | $t/T$ | $e^{-\lambda t}$ | $t/T$ | $e^{-\lambda t}$ |
|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| 0     | 1,000            | 0,52  | 0,6974           | 1,54  | 0,3439           | 3,80  | 0,0718           |
| 0,01  | 0,9931           | 0,54  | 0,6878           | 1,56  | 0,3391           | 3,85  | 0,0693           |
| 0,02  | 0,9862           | 0,56  | 0,6783           | 1,58  | 0,3345           | 3,90  | 0,0670           |
| 0,03  | 0,9794           | 0,58  | 0,6690           | 1,60  | 0,3299           | 3,95  | 0,0647           |
| 0,04  | 0,9726           | 0,60  | 0,6597           | 1,62  | 0,3253           | 4,00  | 0,0625           |
| 0,05  | 0,9659           | 0,62  | 0,6507           | 1,64  | 0,3209           | 4,10  | 0,0583           |
| 0,06  | 0,9593           | 0,64  | 0,6417           | 1,66  | 0,3164           | 4,20  | 0,0544           |
| 0,07  | 0,9526           | 0,66  | 0,6329           | 1,68  | 0,3121           | 4,30  | 0,0508           |
| 0,08  | 0,9461           | 0,68  | 0,6242           | 1,70  | 0,3078           | 4,40  | 0,0474           |
| 0,09  | 0,9395           | 0,70  | 0,6156           | 1,75  | 0,2973           | 4,50  | 0,0442           |
| 0,10  | 0,9330           | 0,72  | 0,6071           | 1,80  | 0,2872           | 4,60  | 0,0412           |
| 0,11  | 0,9266           | 0,74  | 0,5987           | 1,85  | 0,2774           | 4,70  | 0,0385           |
| 0,12  | 0,9202           | 0,76  | 0,5905           | 1,90  | 0,2679           | 4,80  | 0,0359           |
| 0,13  | 0,9138           | 0,78  | 0,5825           | 1,95  | 0,2588           | 4,90  | 0,0335           |
| 0,14  | 0,9075           | 0,80  | 0,5744           | 2,00  | 0,2500           | 5,00  | 0,0312           |
| 0,15  | 0,9013           | 0,82  | 0,5664           | 2,05  | 0,2415           | 5,10  | 0,0292           |
| 0,16  | 0,8950           | 0,84  | 0,5586           | 2,10  | 0,2333           | 5,20  | 0,0272           |
| 0,17  | 0,8888           | 0,86  | 0,5509           | 2,15  | 0,2253           | 5,30  | 0,0254           |
| 0,18  | 0,8827           | 0,88  | 0,5434           | 2,20  | 0,2176           | 5,40  | 0,0237           |
| 0,19  | 0,8766           | 0,90  | 0,5359           | 2,25  | 0,2102           | 5,50  | 0,0221           |
| 0,20  | 0,8705           | 0,92  | 0,5285           | 2,30  | 0,2031           | 5,60  | 0,0206           |
| 0,21  | 0,8645           | 0,94  | 0,5212           | 2,35  | 0,1961           | 5,70  | 0,0192           |
| 0,22  | 0,8586           | 0,96  | 0,5141           | 2,40  | 0,1895           | 5,80  | 0,0179           |
| 0,23  | 0,8526           | 0,98  | 0,5070           | 2,45  | 0,1830           | 5,90  | 0,0167           |
| 0,24  | 0,8467           | 1,00  | 0,5000           | 2,50  | 0,1768           | 6,00  | 0,0156           |
| 0,25  | 0,8409           | 1,02  | 0,4931           | 2,55  | 0,1708           | 6,20  | 0,0136           |
| 0,26  | 0,8351           | 1,04  | 0,4863           | 2,60  | 0,1649           | 6,40  | 0,0118           |
| 0,27  | 0,8293           | 1,06  | 0,4796           | 2,65  | 0,1593           | 6,60  | 0,0103           |
| 0,28  | 0,8236           | 1,08  | 0,4730           | 2,70  | 0,1539           | 6,80  | 0,0090           |
| 0,29  | 0,8179           | 1,10  | 0,4665           | 2,75  | 0,1487           | 7,00  | 0,0078           |
| 0,30  | 0,8122           | 1,12  | 0,4601           | 2,80  | 0,1436           | 7,20  | 0,0068           |
| 0,31  | 0,8066           | 1,14  | 0,4538           | 2,85  | 0,1387           | 7,40  | 0,0059           |
| 0,32  | 0,8011           | 1,16  | 0,4475           | 2,90  | 0,1340           | 7,60  | 0,0052           |
| 0,33  | 0,7955           | 1,18  | 0,4413           | 2,95  | 0,1294           | 7,80  | 0,0045           |
| 0,34  | 0,7900           | 1,20  | 0,4353           | 3,00  | 0,1250           | 8,00  | 0,0039           |
| 0,35  | 0,7846           | 1,22  | 0,4293           | 3,05  | 0,1207           | 8,20  | 0,0034           |
| 0,36  | 0,7792           | 1,24  | 0,4234           | 3,10  | 0,1166           | 8,40  | 0,0030           |
| 0,37  | 0,7738           | 1,26  | 0,4175           | 3,15  | 0,1127           | 8,60  | 0,0026           |
| 0,38  | 0,7684           | 1,28  | 0,4118           | 3,20  | 0,1088           | 8,80  | 0,0022           |
| 0,39  | 0,7631           | 1,30  | 0,4061           | 3,25  | 0,1051           | 9,00  | 0,0020           |
| 0,40  | 0,7579           | 1,32  | 0,4005           | 3,30  | 0,1015           | 9,20  | 0,0017           |
| 0,41  | 0,7526           | 1,34  | 0,3950           | 3,35  | 0,0981           | 9,40  | 0,0015           |
| 0,42  | 0,7474           | 1,36  | 0,3896           | 3,40  | 0,0948           | 9,60  | 0,0013           |
| 0,43  | 0,7423           | 1,38  | 0,3842           | 3,45  | 0,0915           | 9,80  | 0,0011           |
| 0,44  | 0,7371           | 1,40  | 0,3789           | 3,50  | 0,0884           | 10,00 | 0,0010           |
| 0,45  | 0,7320           | 1,42  | 0,3737           | 3,55  | 0,0854           | 10,50 | 0,0007           |
| 0,46  | 0,7270           | 1,44  | 0,3685           | 3,60  | 0,0825           | 11,00 | 0,0005           |
| 0,47  | 0,7220           | 1,46  | 0,3635           | 3,65  | 0,0797           | 11,50 | 0,0004           |
| 0,48  | 0,7170           | 1,48  | 0,3585           | 3,70  | 0,0770           | 12,00 | 0,0002           |
| 0,49  | 0,7120           | 1,50  | 0,3536           | 3,75  | 0,0743           | 13,00 | 0,0001           |
| 0,50  | 0,7071           | 1,52  | 0,3487           |       |                  |       |                  |

#### 4. Radioaktive Mengeneinheit

Nach der Definition der Internationalen Radium-Standard-Kommission aus dem Jahre 1930 ist 1 *Curie* (C) diejenige Menge einer Substanz der Uran-Radium-Reihe, die mit 1 g Radium im Gleichgewicht steht. Im Jahre 1950 wurde die Definition verallgemeinert: Das Curie ist diejenige Menge irgendeiner radioaktiven Kernart, deren Aktivität  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfälle/sec beträgt. Also:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Curie} \quad (\text{C}) &= 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Zerfälle/sec} \\ 1 \text{ Millicurie} \quad (\text{mC}) &= 3,7 \cdot 10^7 \text{ Zerfälle/sec} \\ 1 \text{ Mikrocurie} \quad (\mu\text{C}) &= 3,7 \cdot 10^4 \text{ Zerfälle/sec} \end{aligned}$$

Als spezifische Aktivität wird die im Gramm einer strahlenden Substanz enthaltene Aktivität bezeichnet (C/g, mC/g oder  $\mu\text{C/g}$ ). Die spezifische Aktivität ist für alle biologischen Untersuchungen eine sehr wichtige Größe.

#### 5. Dosisbegriffe

Die wohl eindeutigsten Dosisdefinitionen dürften im DIN-Blatt 6809 (Entwurf) enthalten sein. Sie sollen hier unverändert übernommen werden [2].

##### a) Ionendosis

Die Ionendosis  $J$  einer ionisierenden Strahlung ist der Grenzwert des Quotienten aus der elektrischen Ladung  $\Delta Q$  eines Vorzeichens der Ionenpaare, die in einem Luftelement von der Masse  $\Delta m = \rho_L \cdot \Delta v$  ( $\Delta v$  Volumen;  $\rho_L$  Dichte der Luft) durch die Strahlung unmittelbar oder mittelbar erzeugt werden, und der Masse  $\Delta m$ :

$$J = \frac{dQ}{dm} = \frac{1}{\rho_L} \frac{dQ}{dv} \quad (5)$$

Die Standard-Ionendosis  $J_{st}$  ist die Ionendosis einer Röntgen- oder Gammastrahlung bei Elektronengleichgewicht:

$$J_{st} = \left( \frac{dQ}{dm} \right)_{st} = \frac{1}{\rho_L} \left( \frac{dQ}{dv} \right)_{st} \quad (6)$$

Elektronengleichgewicht in einem Material bedeutet, daß die in dem Volumenelement  $\Delta v$  von allen es durchsetzenden Sekundärelektronen abgegebene Energie gleich derjenigen Energie ist, welche die in  $\Delta v$  durch die Röntgen- oder Gammastrahlung gebildeten Sekundärelektronen auf ihrem gesamten Wege in dem Material abgeben.

Die Einheit der Ionendosis ist das „Röntgen“ (r)

$$\begin{aligned} 1 \text{ r} &= 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Coulomb (C)}}{\text{Kilogramm (kg)}} \\ &= \frac{1}{1,293} \frac{\text{elektrostatische Ladungseinheiten (esE)}}{\text{Milligramm (mg)}} \end{aligned} \quad (7)$$

##### b) Ionendosisleistung

Die Ionendosisleistung  $j$  ist der Differentialquotient der Ionendosis nach der Zeit

$$j = \frac{dJ}{dt} \quad (8)$$

Die Standard-Ionendosisleistung  $j_{st}$  ist die Ionendosisleistung einer Röntgen- oder Gammastrahlung bei Elektronengleichgewicht:

$$j_{st} = \frac{dJ_{st}}{dt} \quad (9)$$

Die Einheit der Ionendosisleistung ist das Röntgen/Sekunde (r/s)

$$1 \text{ r/s} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ampere}}{\text{Kilogramm}} \left( \frac{\text{A}}{\text{kg}} \right) \quad (10)$$

**Tab. 2.** Beziehungen zwischen gebräuchlichen Vielfachen der Einheit der Ionendosisleistung [2]

| Dosis-<br>leistung | mr/h    | $\mu\text{r/s}$ | r/h    | r/min    | r/s        |
|--------------------|---------|-----------------|--------|----------|------------|
| 1 mr/h             | 1       | 0,28            | 0,001  | 0,000017 | 0,00000028 |
| 1 $\mu\text{r/s}$  | 3,6     | 1               | 0,0036 | 0,00006  | 0,000001   |
| 1 r/h              | 1000    | 280             | 1      | 0,017    | 0,00028    |
| 1 r/min            | 60000   | 17000           | 60     | 1        | 0,017      |
| 1 r/s              | 3600000 | 1000000         | 3600   | 60       | 1          |

### c) Energiedosis

Die Energiedosis  $K$  einer ionisierenden Strahlung ist der Grenzwert des Quotienten aus der Energie  $\Delta W$ , die einem Körperelement von der Masse  $\Delta m = \rho \Delta v$  ( $\Delta v$  Volumen;  $\rho$  Dichte des Mediums) durch die Strahlung unmittelbar oder mittelbar zugeführt wird, und der Masse  $\Delta m$ :

$$K = \frac{dW}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dW}{dv} \quad (11)$$

Die Einheit der Energiedosis ist das „Rad“ (rad)

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{Gramm}} \left( \frac{\text{erg}}{\text{g}} \right) = 10^{-2} \frac{\text{Joule}}{\text{Kilogramm}} \left( \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) \quad (12)$$

### d) Energiedosisleistung

Die Energiedosisleistung  $k$  ist der Differentialquotient der Energiedosis nach der Zeit

$$k = \frac{dK}{dt} \quad (13)$$

Die Einheit der Energiedosisleistung ist das Rad/Sekunde  $\left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$

$$1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 100 \frac{\text{Gramm} \cdot \text{Sekunde}}{\text{erg}} \left( \frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{s}} \right) = 10^{-2} \frac{\text{Watt}}{\text{Kilogramm}} \left( \frac{\text{W}}{\text{kg}} \right) \quad (14)$$

Für die Beziehungen zwischen gebräuchlichen Vielfachen der Einheit der Energiedosisleistung gelten dieselben Zahlenwerte wie in Tabelle 2.

### e) Dosiskonstante von Gammastrahlern

Die Dosiskonstante  $I_\gamma$  eines Gammastrahlers ist das Produkt aus der Standard-Ionendosisleistung  $j_{st}$ , welche die Strahlung ohne Berücksichtigung der Schwächung

in Luft in einem gegen die linearen Abmessungen des Strahlers großen Abstände  $b$  vom Strahler bewirkt, und dem Quadrat des Abstandes  $b$ , dividiert durch die Aktivität  $A\gamma$  des Strahlers:

$$I\gamma = \frac{j_{st} b^2}{A\gamma} \quad (15)$$

Die Dosiskonstante wird für ungefilterte Strahlung angegeben, mit Ausnahme des Radiums, dessen Dosiskonstante für 0,5 mm Platinfilter gilt.

Die Einheit der Dosiskonstanten ist das

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Röntgen}}{\text{Stunde}} : \frac{\text{Quadratmeter}}{\text{Curie}} \left( \frac{r \cdot m^2}{h \cdot C} \right) \\ 1 \frac{r \cdot m^2}{h \cdot C} &= 1,94 \cdot 10^{-18} \frac{\text{Ampere} \cdot \text{Quadratmeter} \cdot \text{Sekunde}}{\text{Kilogramm}} \left( \frac{A \cdot m^2 \cdot s}{\text{kg}} \right) \\ &= 1,94 \cdot 10^{-18} \frac{\text{Coulomb} \cdot \text{Quadratmeter}}{\text{Kilogramm}} \left( \frac{C \cdot m^2}{\text{kg}} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Tab. 3. Dosiskonstanten verschiedener Radioisotope

[3]

| Isotop           | $I\gamma \left( \frac{r \cdot m^2}{h \cdot C} \right)$ | Isotop            | $I\gamma \left( \frac{r \cdot m^2}{h \cdot C} \right)$ |
|------------------|--------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|
| Na <sup>22</sup> | 1,32                                                   | Zn <sup>65</sup>  | 0,3                                                    |
| Na <sup>24</sup> | 1,91                                                   | As <sup>76</sup>  | 0,22                                                   |
| K <sup>42</sup>  | 0,195                                                  | Bi <sup>82</sup>  | 1,51                                                   |
| Sc <sup>46</sup> | 1,14                                                   | Sb <sup>124</sup> | 0,79                                                   |
| V <sup>48</sup>  | 1,63                                                   | I <sup>131</sup>  | 0,265                                                  |
| Mn <sup>52</sup> | 1,95                                                   | Cs <sup>137</sup> | 0,29                                                   |
| Mn <sup>54</sup> | 0,49                                                   | Au <sup>198</sup> | 0,24                                                   |
| Fe <sup>59</sup> | 0,655                                                  | Ra in 0,25 mm Pt  | 0,88                                                   |
| Co <sup>58</sup> | 0,57                                                   | Ra in 0,5 mm Pt   | 0,84                                                   |
| Co <sup>60</sup> | 1,35                                                   | Ra in 2,5 mm Pt   | 0,63                                                   |
| Cu <sup>64</sup> | 0,12                                                   | Ra in 5,0 mm Pt   | 0,46                                                   |

#### f) Gewebstdosis

Wenn in einem Organ der Masse  $M$  der Anteil  $p$  einer Aktivitätsmenge  $A$  gespeichert wird, so enthält das Organ

$$U = p \cdot A \quad (17)$$

Aktivitätseinheiten. Diese werden je nach Art des Isotops mit einer gewissen Geschwindigkeit aus dem Organ verschwinden. Ein Maß für die Geschwindigkeit ist die „Effektive Halbwertszeit“

$$T_e = \frac{\text{Biologische Halbwertszeit} \times \text{Physikalische Halbwertszeit}}{\text{Biologische Halbwertszeit} + \text{Physikalische Halbwertszeit}} \quad (18)$$

Die integrale Gewebstdosis ist dann [4]

$$D_s = 1,60 \cdot 10^4 \frac{U \cdot T_e}{M} \quad [\text{rad}] \quad (19)$$

Gleichung (19) gilt vorzugsweise für Beta-Strahler. Bei komplexen Emissionsspektren muß die Gamma-Komponente prozentual berücksichtigt werden.

## g) Erläuterung zur Standard-Ionendosis

Die Standard-Ionendosis stellt einen Sonderfall der allgemein gültigen Ionendosis dar, da sie auf Röntgen- und Gammastrahlen praktisch bis zu einer maximalen Energie von etwa 3 MeV beschränkt ist und die Bedingungen des Elektronengleichgewichts erfüllen muß. Sie gibt den Anschluß an die auf der bisherigen Definition des Röntgen beruhenden Messungen und bildet die Grundlage der Dosimetrie im konventionellen Bereich der Röntgenstrahlen, für den sich bezüglich der Meßverfahren und der Anzeige der Meßinstrumente hierdurch also nichts ändert. Elektronengleichgewicht besteht z. B. innerhalb des Meßvolumens einer Ionisationskammer, wenn dieses Volumen allseitig von einer Luftschicht umgeben ist, deren Dicke größer als die maximale Reichweite  $R_{el}$  der Sekundärelektronen und wenn gleichzeitig  $R_{el} \ll \frac{1}{\mu}$  ist ( $\mu$  Schwächungskoeffizient der Wellenstrahlung) oder wenn das

Meßvolumen von einer Schicht anderen Materials umgeben ist, für das diese beiden Bedingungen und die Voraussetzungen erfüllt sind, daß der Massenabsorptionskoeffizient der Wellenstrahlung und das Massenbremsvermögen der Elektronen in diesem Material annähernd gleich denen in Luft sind. Ein solches „luftäquivalentes“ Material kann in der Dichte erheblich von Luft abweichen, dagegen nur wenig in der atomaren Zusammensetzung.

Bei ultraharten Röntgenstrahlen oberhalb 3 MeV ist die Bedingung  $R_{el} \ll \frac{1}{\mu}$  nicht mehr erfüllt, außerdem geht mit steigender Quantenenergie die Richtungsisotropie der Sekundärstrahlung mehr und mehr verloren.

## 6. Praktische Daten

Tab. 4. Haupt-Gammalinien des Radiumzerfalls

[5]

| Übergang                             | Gammaenergie<br>MeV | Relativer<br>Anteil |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Radium $\longrightarrow$ Radon       | 0,18                | 1,2                 |
| Radium B $\longrightarrow$ Radium C  | 0,241               | 11,5                |
|                                      | 0,294               | 25,8                |
|                                      | 0,350               | 45,0                |
| Radium C $\longrightarrow$ Radium C' | 0,607               | 65,8                |
|                                      | 0,766               | 6,5                 |
|                                      | 0,933               | 6,7                 |
|                                      | 1,120               | 20,6                |
|                                      | 1,238               | 6,3                 |
|                                      | 1,379               | 6,4                 |
|                                      | 1,761               | 25,8                |
|                                      | 2,198               | 7,4                 |
|                                      |                     | <hr/> 229,0         |

**Tab. 5.** Energieabsorption in erg pro Gramm pro r für verschiedene biologische Gewebe als Funktion der Gammaenergie [6]

| Photonenergie<br>MeV | Knochen | Muskel-<br>gewebe | Fett |
|----------------------|---------|-------------------|------|
| 0,01                 | 480     | 87                | 47   |
| 0,02                 | 475     | 87                | 47   |
| 0,05                 | 395     | 88                | 57   |
| 0,1                  | 170     | 92                | 86   |
| 0,2                  | 95      | 93                | 97   |
| 0,5                  | 84      | 93                | 98   |
| 1,0                  | 84      | 93                | 98   |
| 2,0                  | 84      | 92                | 98   |
| 5,0                  | 88      | 91                | 94   |
| 10                   | 93      | 90                | 90   |
| 20                   | 99      | 89                | 83   |
| 50                   | 108     | 87                | 77   |
| 100                  | 108     | 85                | 73   |

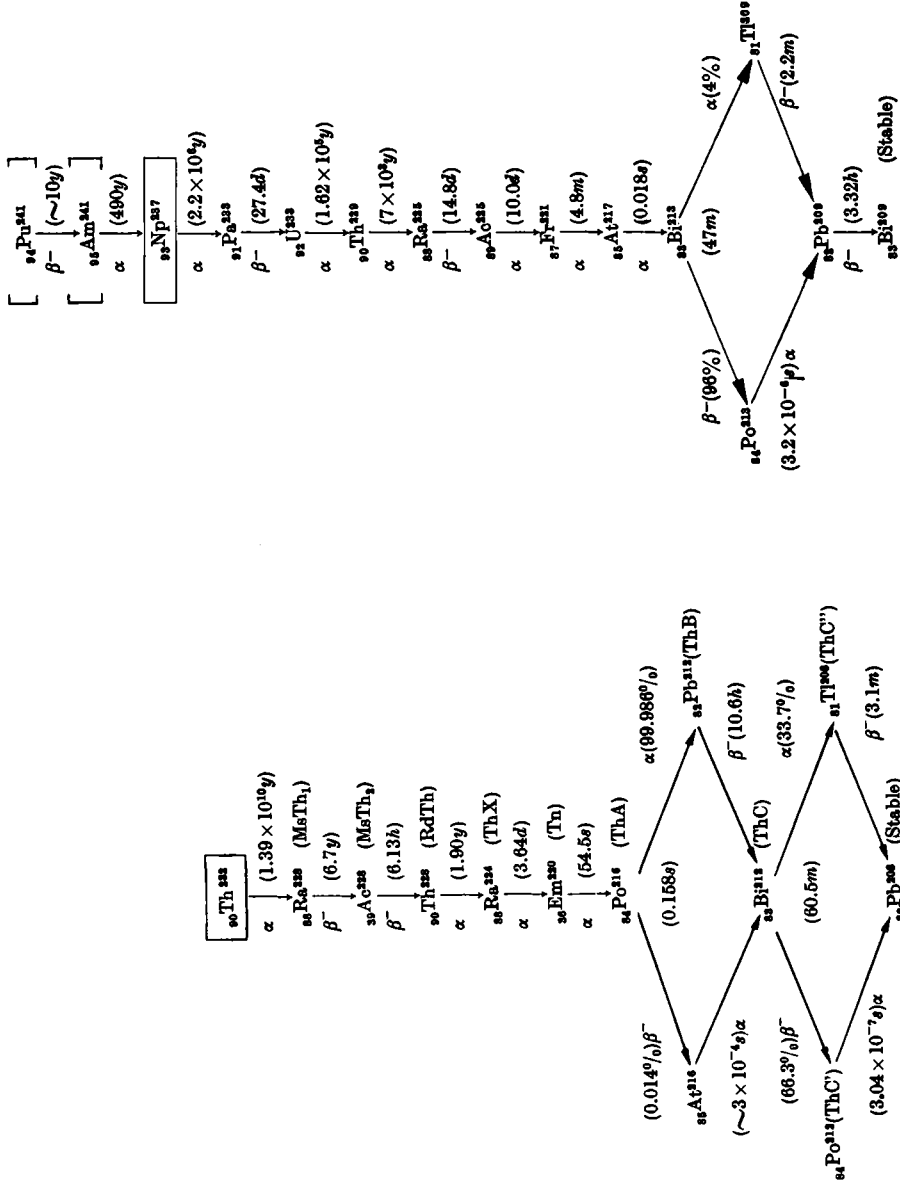
**Tab. 6.** Absorbierte Strahlungsenergie in erg pro Gramm pro r [7]

| Quanten-<br>energie<br>[keV] | Üblicherweise als mittlere Härte<br>emittiert von | Absorbierte Energie<br>pro Gramm pro r<br>[erg pro g pro r] |                 |         |
|------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------|---------|
|                              |                                                   | Muskel-<br>gewebe                                           | Fett-<br>gewebe | Knochen |
| 10                           | 50 kV Röntgenröhre . . . . .                      | 87                                                          | 46              | 490     |
| 50                           | 140 kV Röntgenröhre . . . . .                     | 90                                                          | 58              | 400     |
| 100                          | 200 kV Röntgenröhre . . . . .                     | 93                                                          | 85              | 170     |
| 200                          | 500 kV Röntgenröhre . . . . .                     | 93                                                          | 95              | 93      |
| 1000                         | Kobalt-60 . . . . .                               | 93                                                          | 95              | 85      |
| 10000                        | Betatron oder Linearbeschleuniger .               | 90                                                          | 90              | 90      |

**Anmerkung:** Die angegebenen Zahlen sind nur in den sich im „Elektronengleichgewicht“ befindenden Gewebegebieten gültig.

**Tab. 7.** Relative biologische Wirksamkeit von verschiedenen Strahlungsarten [8]

| Strahlungsart                                               | R. B. W. |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| Röntgen- und Gammastrahlung der Energie 0,1—3 MeV . . . . . | 1        |
| Betastrahlen und schnelle Elektronen . . . . .              | 1        |
| Protonen. . . . .                                           | 10       |
| Schnelle Neutronen der Energie < 20 MeV . . . . .           | 10       |
| Alpha-Teilchen . . . . .                                    | 20       |



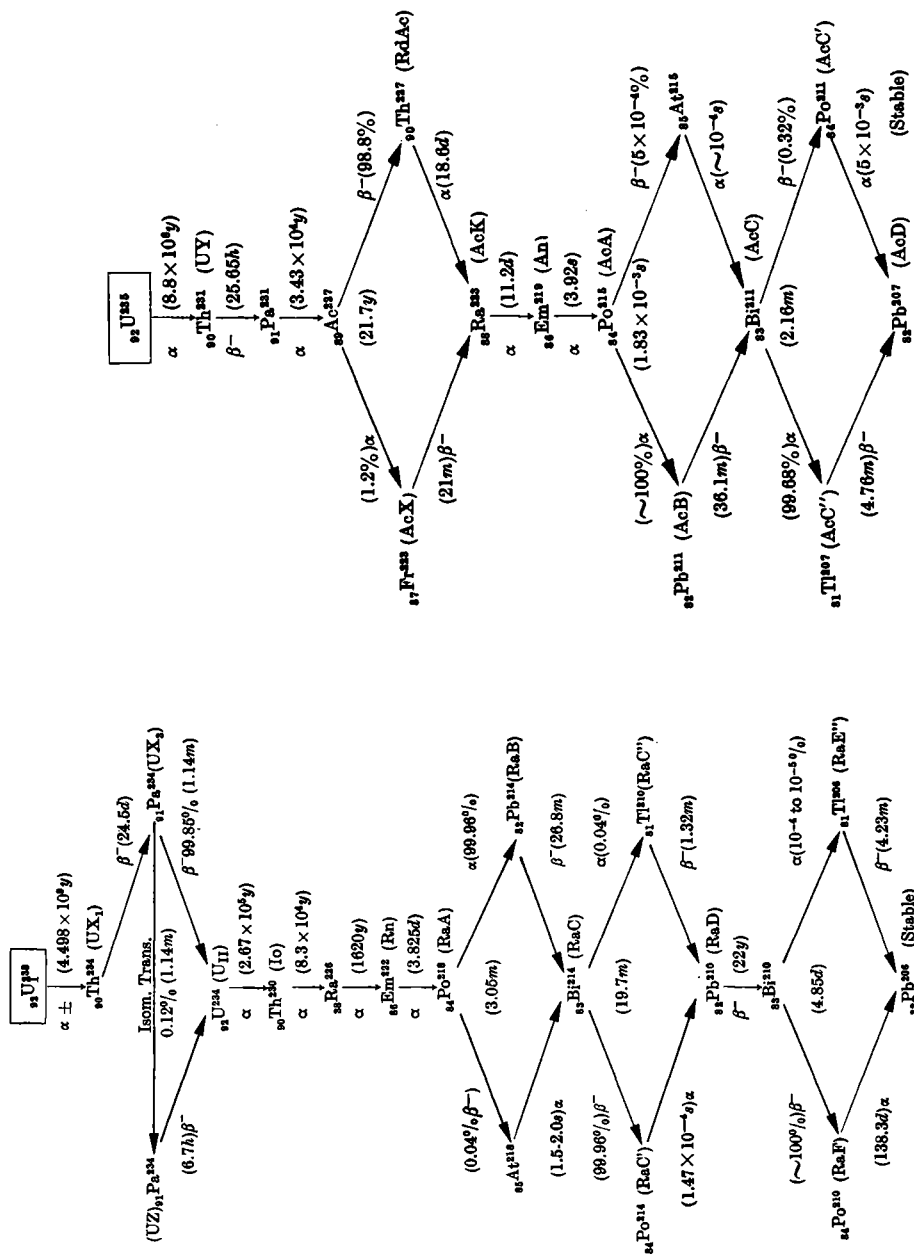


Abb. 3. Zerfallsschema der Uran-Radiumreihe

Abb. 4. Zerfallsschema der Uran-Aktinierreihe

Tab. 8. Radioaktive Isotope, die aus Harwell bezogen werden können

[9]

| Art des chemischen Elements | Symbol des rad. Isotops | Halbwertszeit $T$ | Strahlenart                     | $\beta$ -Energie in MeV                                         |                   | $\gamma$ -Energie in MeV                                   |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------|
|                             |                         |                   |                                 | $E_{\max}$                                                      | $E_{\text{mit.}}$ |                                                            |
| Antimon                     | $^{122}_{51}\text{Sb}$  | 2,8 d             | $\beta^-$ , $\gamma$            | 1,94; 1,36                                                      | —                 | 0,568;                                                     |
|                             | $^{124}_{51}\text{Sb}$  | 60 d              | $\beta^-$ , $\gamma$            | 2,37 (21);<br>1,62 (8);<br>100 (9);<br>0,65 (44);<br>0,48 (18); | —                 | 1,708;<br>0,732;<br>0,654;<br>0,608;<br>2,04<br>(schwach); |
|                             | $^{125}_{51}\text{Sb}$  | 2,7 y             | $\beta^-$ , $\gamma$            | 0,616 (18);<br>0,299 (49);<br>0,128 (33)                        | —                 | 0,646 usw.<br>7 $\gamma'$ s                                |
| Arsen                       | $^{76}_{33}\text{As}$   | 26,8 h            | $\beta^-$ , $\gamma$            | 3,04 (60);<br>2,49 (25);<br>1,29 (15);                          | 1,18              | 1,75; 1,2;<br>0,55                                         |
|                             | $^{77}_{33}\text{As}$   | 40 h              | $\beta^-$                       | 0,8                                                             | 0,24              | —                                                          |
| Barium                      | $^{131}_{56}\text{Ba}$  | 12 d              | $\kappa$ , $\gamma$             |                                                                 | —                 | 1,2<br>(schwach);<br>0,5; 0,26;                            |
| Brom                        | $^{82}_{35}\text{Br}$   | 35,8 h            | $\beta^-$ , $\gamma$            | 0,447;<br>0,323;<br>0,181;                                      | —                 | 1,321;<br>1,036<br>0,769;<br>0,652;<br>0,61; 0,55          |
| Cadmium                     | $^{115}_{48}\text{Cd}$  | 53 h              | $\beta^-$ , $\gamma$            | 1,13; 0,6;                                                      | —                 | 0,54; 0,5;                                                 |
| Caesium                     | $^{131}_{55}\text{Cs}$  | 9,6 d             | $\kappa$                        | —                                                               | —                 | (0,145);                                                   |
|                             | $^{134}_{55}\text{Cs}$  | 1,7 y             | $\beta^-$ , $\gamma$            | 0,658 (75);<br>0,99 (25)                                        | 0,16              | 1,35<br>(schwach);<br>0,794;<br>0,602;<br>0,568            |
|                             | $^{137}_{55}\text{Cs}$  | 30 y              | $\beta^-$ , $\gamma$ , $\kappa$ | 0,52 (92)<br>1,17 (8)                                           |                   | 0,662                                                      |
| Calcium                     | $^{45}_{20}\text{Ca}$   | 152 d             | $\beta^-$                       | 0,254                                                           | 0,09              | —                                                          |
| Cer                         | $^{141}_{58}\text{Ce}$  | 30 d              | $\beta^-$ , $\gamma$            | 0,66                                                            | —                 | 0,21;                                                      |
| Chrom                       | $^{51}_{24}\text{Cr}$   | 26,5 d            | $\kappa$ , $\gamma$             | —                                                               | 0,0054            | 0,323;<br>0,237;                                           |
| Eisen                       | $^{55}_{26}\text{Fe}$   | 5,0 y             | $\kappa$                        |                                                                 | 0,0064            |                                                            |
|                             | $^{59}_{26}\text{Fe}$   | 45,1 d            | $\beta^-$ , $\gamma$            | 0,46 (50);<br>0,26 (50);                                        | 0,12              | 1,3; 1,1;                                                  |

Tab. 8. Radioaktive Isotope, die aus Harwell bezogen werden können (Fortsetzung) [9]

| Art des chemischen Elements | Symbol des rad. Isotops  | Halbwertszeit $T$ | Strahlenart                            | $\beta$ -Energie in MeV                                                                  |                   | $\gamma$ -Energie in MeV                                                        |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                          |                   |                                        | $E_{\max}$                                                                               | $E_{\text{mit.}}$ |                                                                                 |
| Europium                    | ${}_{63}\text{Eu}^{152}$ | 13 y              | $\beta^-$ , $\gamma$                   | (1,575);<br>0,751<br>1,88                                                                | —                 | 1,23 usw.<br>0,725;<br>0,163;<br>0,123;<br>1,4 usw.                             |
|                             | ${}_{63}\text{Eu}^{154}$ | 16 y              | $\beta^-$ , $\gamma$                   | (1,6)                                                                                    | —                 |                                                                                 |
| Gallium                     | ${}_{31}\text{Ga}^{72}$  | 14,1 h            | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 3,17 (8);<br>2,57 (8);<br>1,74 (3);<br>15,4 (7);<br>1,0 (26);<br>0,74 (23);<br>0,56 (25) | 0,46              | 2,5; 2,18;<br>1,81;<br>0,835;<br>0,691;<br>0,631;<br>(1,05; 1,3;<br>1,47; 1,57) |
| Germanium                   | ${}_{32}\text{Ge}^{71}$  | 11,4 d            | $\kappa$ , $\gamma$                    | —                                                                                        | —                 | 0,32                                                                            |
| Gold                        | ${}_{79}\text{Au}^{198}$ | 2,69 d            | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 0,96                                                                                     | 0,34              | 0,411                                                                           |
| Hafnium                     | ${}_{72}\text{Hf}^{181}$ | 46 d              | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 0,405                                                                                    | 0,2               | 0,471;<br>0,337;<br>0,134;<br>0,13                                              |
| Holmium                     | ${}_{67}\text{Ho}^{166}$ | 27 h              | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 1,64                                                                                     | —                 | 0,92; 0,081                                                                     |
| Indium                      | ${}_{49}\text{In}^{114}$ | 48 d              | $\gamma$                               | —                                                                                        | —                 | 0,192;<br>0,552;<br>0,722; 1,27                                                 |
| Jod                         | ${}_{53}\text{J}^{131}$  | 8,1 d             | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 0,605 (86);<br>0,25 (14)                                                                 | 0,17              | 0,637;<br>0,363;<br>0,282; 0,08                                                 |
| Iridium                     | ${}_{77}\text{Ir}^{192}$ | 70 d              | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 0,59                                                                                     | —                 | 0,19 bis<br>0,615;<br>12 $\gamma$ 's                                            |
| Kalium                      | ${}_{19}\text{K}^{42}$   | 12,4 h            | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 3,58 (75);<br>2,07 (25)                                                                  | 1,40              | 1,51                                                                            |
| Kobalt                      | ${}_{27}\text{Co}^{60}$  | 5,3 y             | $\beta^-$ , $\gamma$                   | 0,308                                                                                    | 0,099             | 1,17; 1,33;                                                                     |
| Kohlenstoff                 | ${}_{6}\text{C}^{14}$    | $\sim 6000$ y     | $\beta^-$                              | 0,05                                                                                     | 0,155             | —                                                                               |
| Kupfer                      | ${}_{29}\text{Cu}^{64}$  | 12,8 h            | $\beta^-$ , ${}^+\text{n}$<br>$\kappa$ | $\beta^-$ : 0,571;<br>$\beta$ : 0,657                                                    | 0,12              | 1,2<br>(schwach)                                                                |

Tab. 8. Radioaktive Isotope, die aus Harwell bezogen werden können (Fortsetzung) [9]

| Art des chemischen Elements | Symbol des rad. Isotops | Halbwertszeit $T$ | Strahlenart          | $\beta$ -Energie in MeV               |                   | $\gamma$ -Energie in MeV                                  |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------|
|                             |                         |                   |                      | $E_{\max}$                            | $E_{\text{mit.}}$ |                                                           |
| Lanthan                     | $_{57}\text{La}^{140}$  | 40 h              | $\beta^-$ , $\beta$  | 2,26 (10);<br>1,67 (20);<br>1,32 (70) | —                 | 2,5 (sehr schwach);<br>1,62; 0,82<br>0,49; 0,34;<br>0,093 |
| Mangan                      | $_{25}\text{Mn}^{56}$   | 2,6 h             | $\beta^-$ , $\gamma$ | 2,81 (50);<br>1,04 (30);<br>0,75 (20) | 0,77              | 2,06<br>1,18;<br>0,822                                    |
| Molybdän                    | $_{42}\text{Mo}^{99}$   | 68 h              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,3                                   | —                 | 0,75; 0,24                                                |
| Natrium                     | $_{11}\text{Na}^{24}$   | 15,1 h            | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,39                                  | 0,54              | 2,76; 1,38                                                |
| Osmium                      | $_{76}\text{Os}^{191}$  | 32 h              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,15                                  | —                 | 1,58                                                      |
|                             | $_{76}\text{Os}^{193}$  | 17 d              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 0,15                                  | —                 | 0,13                                                      |
| Palladium                   | $_{46}\text{Pd}^{109}$  | 13 h              | $\beta^-$            | 1,1                                   | 0,35              | —                                                         |
| Phosphor                    | $_{15}\text{P}^{32}$    | 14,3 d            | $\beta^-$            | 1,69                                  | 0,685             | —                                                         |
|                             | $_{15}\text{P}^{32}$    |                   | trägerfrei           |                                       | —                 |                                                           |
| Platin                      | $_{78}\text{Pt}^{197}$  | 18 h              | $\beta^-$            | 0,65                                  | —                 | —                                                         |
| Polonium                    | $_{84}\text{Po}^{210}$  | 138 d             | $\alpha$ , $\gamma$  | $\alpha$ : 5,298                      | —                 | 0,8<br>(schwach)                                          |
| Praseodym                   | $_{59}\text{Pr}^{142}$  | 19,3 h            | $\beta^-$ , $\gamma$ | 2,52; 0,35                            | 0,82              | 1,53; $\sim$ 0,7                                          |
|                             | $_{59}\text{Pr}^{143}$  | 13,8 d            | $\beta^-$            | 0,93                                  | —                 | —                                                         |
| Quecksilber                 | $_{80}\text{Hg}^{203}$  | 43,5 d            | $\beta^-$ , $\gamma$ | 0,208                                 | 0,11              | 0,279                                                     |
| Rhenium                     | $_{75}\text{Re}^{186}$  | 91 h              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,073                                 | 0,38              | 0,212;<br>0,138                                           |
|                             | $_{75}\text{Re}^{188}$  | 18 h              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 2,15; 0,97                            | —                 | 0,16—1,43                                                 |
| Rhodium                     | $_{25}\text{Rh}^{105}$  | 36 h              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 0,78                                  | 0,26              | 0,33                                                      |
| Rubidium                    | $_{37}\text{Rb}^{86}$   | 19,5 d            | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,822 (80);<br>0,716 (20)             | 0,63              | 1,081                                                     |
| Ruthenium                   | $_{44}\text{Ru}^{97}$   | 2,8 d             | $\alpha$ , $\gamma$  | —                                     | —                 | 0,22; 0,18                                                |
|                             | $_{44}\text{Ru}^{103}$  | 42 d              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 0,68 (8);<br>0,15 (92)                | —                 | 0,52                                                      |
|                             | $_{44}\text{Ru}^{105}$  | 4 h               | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,5                                   | 0,09              | 0,76                                                      |
| Samarium                    | $_{62}\text{Sm}^{153}$  | 50 h              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,23                                  | —                 | 0,102                                                     |
| Scandium                    | $_{21}\text{Sc}^{46}$   | 85 d              | $\beta^-$ , $\gamma$ | 1,49 (2);<br>0,36 (98)                | 0,13              | 0,89; 1,12                                                |

Tab. 8. Radioaktive Isotope, die aus Harwell bezogen werden können (Fortsetzung) [9]

| Art des chemischen Elements | Symbol des rad. Isotops                      | Halbwertszeit $T$ | Strahlenart             | $\beta$ -Energie in MeV                  |                   | $\gamma$ -Energie in MeV        |
|-----------------------------|----------------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|
|                             |                                              |                   |                         | $E_{\max}$                               | $E_{\text{mit.}}$ |                                 |
| Schwefel                    | $^{16}\text{S}^{35}$<br>$^{16}\text{S}^{35}$ | 87,1 d            | $\beta^-$<br>trägerfrei | 0,168                                    | 0,053             | —                               |
| Selen                       | $^{34}\text{Se}^{75}$                        | 125 d             | $\alpha, \gamma$        | —                                        | —                 | 0,076—0,405                     |
| Silber                      | $^{47}\text{Ag}^{110}$                       | 225 d             | $\beta^-, \gamma$       | 2,97 (5);<br>0,57; 0,19;<br>0,99         | 0,23              | 1,48; 0,9<br>0,66 usw.          |
|                             | $^{47}\text{Ag}^{111}$                       | 7,6 d             | $\beta^-$               | 1,0; 0,24                                | 0,26              | —                               |
| Silicium                    | $^{14}\text{Si}^{31}$                        | 2,85 h            | $\beta^-$               | 1,65; 0,67                               | 0,72              | —                               |
| Strontium                   | $^{38}\text{Sr}^{89}$                        | 53 h              | $\beta^-$               | 1,46                                     | 0,58              | —                               |
|                             | $^{38}\text{Sr}^{90}$                        | 28 y              | $\beta^-$               | 0,61                                     | —                 | —                               |
| Tantal                      | $^{73}\text{Ta}^{182}$                       | 120 d             | $\beta^-, \gamma$       | 0,5                                      | —                 | 1,13; 1,22<br>(Komplex)         |
| Technetium                  | $\text{Tc}^{97}$                             | 93 d              | $\alpha, \gamma$        | —                                        | —                 | 0,097                           |
| Tellur                      | $^{52}\text{Te}^{127}$                       | 115 d<br>9,3 h    | $e^-, \beta, \gamma$    | $e^-$ : 0,7                              | 0,42              | 0,0855; —                       |
| Thallium                    | $^{81}\text{Tl}^{204}$                       | 2,7 y             | $\beta^-$               | 0,775                                    | 0,28              | —                               |
| Wismut                      | $^{83}\text{Bi}^{210}$<br>(RaE)              | 5 d               | $\alpha, \beta^-$       | $\alpha$ : 4,77;<br>$\beta^-$ : 1,17     | —                 | —                               |
| Wolfram                     | $^{74}\text{W}^{183}$                        | 76 d              | $\beta^-, \gamma$       | 0,69; 0,48                               | 0,13              | 0,1337                          |
|                             | $^{74}\text{W}^{187}$                        | 24,1 h            | $\beta^-, \gamma$       | 1,33 (30);<br>0,63 (70)                  | —                 | 0,696;<br>0,618;<br>0,48; 0,078 |
| Yttrium                     | $^{39}\text{Y}^{90}$                         | 61 h              | $\beta^-$               | 2,2                                      | 0,97              | —                               |
| Zink                        | $^{30}\text{Zn}^{65}$                        | 250 d             | $\beta^-, \pi, \gamma$  | $\alpha, e^-$ (99)<br>$\beta$ : 0,32 (1) | 0,01              | 1,118 (46)                      |
|                             | $^{30}\text{Zn}^{69}$                        | 13,8 h<br>59 m    | $e^-, \gamma, \beta$    | $e^-$ 1,0                                | 0,31              | 0,44; —                         |
| Zinn                        | $^{50}\text{Sn}^{113}$                       | 105 d             | $\alpha, e^-, \gamma$   | $\alpha, e^-$                            | —                 | 0,085                           |
| Zirkonium                   | $^{40}\text{Zr}^{95}$                        | 65 d              | $\beta^-, \gamma$       | 1,4 (2);<br>0,39 (98)                    | —                 | 0,91; 0,7                       |

Tab. 9. Daten von betastrahlenden-Isotopen in Medizin und Biologie

[10]

| Isotop                 | Mittlere<br>Beta-Energie<br>MeV | Dosis in r<br>pro $\mu\text{C}$<br>im Gramm<br>Gewebe | Isotopenkonzentra-<br>tion zur Abgabe<br>von 0,1 rep/Tag<br>in $\mu\text{C}/\text{kg}$ | Max. Beta-<br>Reichweite<br>im Wasser,<br>in mm | Gewicht pro<br>$\mu\text{C} \times 10^{-9}$<br>in g |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $^6\text{C}^{14}$      | 0,05                            | $8,8 \times 10^6$                                     | 32                                                                                     | 0,24                                            | $1,8 \times 10^5$                                   |
| $^{11}\text{Na}^{22}$  | 0,225                           | $1,8 \times 10^4$                                     | 7,1                                                                                    | 2,1                                             | 197                                                 |
| $^{11}\text{Na}^{24}$  | 0,540                           | 29                                                    | 5,2                                                                                    | 6,4                                             | 0,113                                               |
| $^{15}\text{P}^{32}$   | 0,695                           | 870                                                   | 2,4                                                                                    | 8,0                                             | 3,6                                                 |
| $^{16}\text{S}^{35}$   | 0,055                           | 420                                                   | 30                                                                                     | 0,2                                             | 24                                                  |
| $^{19}\text{K}^{42}$   | 1,395                           | 63                                                    | 2,1                                                                                    | 19                                              | 0,167                                               |
| $^{20}\text{Ca}^{45}$  | 0,10                            | 1340                                                  | 17                                                                                     | 0,8                                             | 62                                                  |
| $^{21}\text{Sc}^{46}$  | 1,117                           | 870                                                   | 14,3                                                                                   | 1,0                                             | 30                                                  |
| $^{23}\text{V}^{48}$   | 0,175                           | 245                                                   | 9,7                                                                                    | 2,8                                             | 5,9                                                 |
| $^{25}\text{Mn}^{52}$  | 0,085                           | 45                                                    | 20                                                                                     | 2,2                                             | 2,6                                                 |
| $^{25}\text{Mn}^{54}$  | 0,0054                          | 147                                                   | 340                                                                                    | ...                                             | 128                                                 |
| $^{26}\text{Fe}^{55}$  | 0,0059                          | 610                                                   | 280                                                                                    | ...                                             | 633                                                 |
| $^{26}\text{Fe}^{59}$  | 0,120                           | 477                                                   | 13,9                                                                                   | 1,5                                             | 21,3                                                |
| $^{27}\text{Co}^{58}$  | 0,035                           | 22                                                    | 480                                                                                    | 1,5                                             | 29                                                  |
| $^{27}\text{Co}^{60}$  | 0,099                           | $1,7 \times 10^4$                                     | 16,5                                                                                   | 0,8                                             | 893                                                 |
| $^{29}\text{Cu}^{64}$  | 0,120                           | 5,6                                                   | 24,4                                                                                   | 2,6                                             | 0,26                                                |
| $^{30}\text{Zn}^{65}$  | 0,01                            | 180                                                   | 185                                                                                    | 1,2                                             | 124                                                 |
| $^{33}\text{As}^{76}$  | 1,170                           | 115                                                   | 1,9                                                                                    | 15,7                                            | 0,655                                               |
| $^{35}\text{Br}^{82}$  | 0,150                           | 20                                                    | 13,5                                                                                   | 1,6                                             | 0,95                                                |
| $^{38}\text{Sr}^{89}$  | 0,57                            | 2700                                                  | 2,9                                                                                    | 7                                               | 38                                                  |
| $^{38}\text{Sr}^{90}$  | 0,22                            | $1,4 \times 10^4$                                     | 7                                                                                      | 2,2                                             | 6200                                                |
| $^{39}\text{Y}^{90}$   | 0,90                            | 200                                                   | 2                                                                                      | 11                                              | 18                                                  |
| $^{51}\text{Sb}^{124}$ | 0,66                            | 3500                                                  | 2,4                                                                                    | 12,3                                            | 57                                                  |
| $^{53}\text{I}^{131}$  | 0,205                           | 145                                                   | 8,3                                                                                    | 2,2                                             | 8,1                                                 |
| $^{79}\text{Au}^{198}$ | 0,32                            | 76                                                    | 5,7                                                                                    | 3,8                                             | 4,1                                                 |

Tab. 10. Abfallcharakteristik für Natrium-24

[11]

Halbwertszeit = 15,1 Std.

| min | 0     | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Std |       |       |       |       |       |       |
| 0   | ...   | 0,985 | 0,969 | 0,954 | 0,940 | 0,925 |
| 2   | 0,911 | 0,897 | 0,884 | 0,870 | 0,856 | 0,843 |
| 4   | 0,830 | 0,818 | 0,805 | 0,792 | 0,780 | 0,768 |
| 6   | 0,756 | 0,744 | 0,733 | 0,722 | 0,711 | 0,700 |
| 8   | 0,689 | 0,678 | 0,668 | 0,658 | 0,648 | 0,638 |
| 10  | 0,628 | 0,619 | 0,609 | 0,600 | 0,590 | 0,581 |
| 12  | 0,572 | 0,563 | 0,555 | 0,546 | 0,538 | 0,529 |
| 14  | 0,521 | 0,513 | 0,505 | 0,497 | 0,490 | 0,482 |
| 16  | 0,475 | 0,468 | 0,461 | 0,454 | 0,447 | 0,440 |
| 18  | 0,433 | 0,427 | 0,420 | 0,414 | 0,407 | 0,401 |
| 20  | 0,395 | 0,389 | 0,383 | 0,377 | 0,371 | 0,366 |
| 22  | 0,360 | 0,355 | 0,349 | 0,344 | 0,339 | 0,333 |
| 24  | 0,328 | 0,323 | 0,318 | 0,313 | 0,308 | 0,303 |
| 26  | 0,299 | 0,295 | 0,290 | 0,286 | 0,281 | 0,276 |
| 28  | 0,272 | 0,268 | 0,264 | 0,260 | 0,254 | 0,252 |
| 30  | 0,248 | 0,244 | 0,240 | 0,237 | 0,233 | 0,229 |
| 32  | 0,225 | 0,222 | 0,218 | 0,215 | 0,212 | 0,208 |
| 34  | 0,205 | 0,202 | 0,199 | 0,196 | 0,193 | 0,190 |
| 36  | 0,188 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,176 | 0,173 |
| 38  | 0,171 | 0,168 | 0,166 | 0,164 | 0,162 | 0,159 |
| 40  | 0,157 | 0,155 | 0,152 | 0,149 | 0,147 | 0,144 |
| 42  | 0,142 | 0,140 | 0,138 | 0,135 | 0,133 | 0,131 |
| 44  | 0,129 | 0,127 | 0,125 | 0,123 | 0,121 | 0,120 |
| 46  | 0,118 | 0,116 | 0,114 | 0,113 | 0,111 | 0,109 |
| 48  | 0,107 | 0,105 | 0,103 | 0,102 | 0,100 | 0,099 |

Tab. 11. Abfallcharakteristik für Phosphor-32

[11]

Halbwertszeit = 14,3 Tage

| Std. | 0     | 6     | 12    | 18    |
|------|-------|-------|-------|-------|
| Tage |       |       |       |       |
| 0    | ...   | 0,988 | 0,976 | 0,964 |
| 1    | 0,952 | 0,941 | 0,929 | 0,918 |
| 2    | 0,907 | 0,896 | 0,885 | 0,875 |
| 3    | 0,864 | 0,854 | 0,843 | 0,833 |
| 4    | 0,823 | 0,813 | 0,804 | 0,794 |
| 5    | 0,784 | 0,775 | 0,765 | 0,756 |
| 6    | 0,747 | 0,738 | 0,729 | 0,720 |
| 7    | 0,712 | 0,703 | 0,695 | 0,686 |
| 8    | 0,678 | 0,670 | 0,662 | 0,654 |
| 9    | 0,646 | 0,638 | 0,630 | 0,623 |
| 10   | 0,615 | 0,608 | 0,601 | 0,593 |
| 11   | 0,586 | 0,579 | 0,572 | 0,565 |
| 12   | 0,558 | 0,552 | 0,545 | 0,539 |
| 13   | 0,532 | 0,526 | 0,519 | 0,513 |
| 14   | 0,507 | 0,501 | 0,495 | 0,489 |
| 15   | 0,483 | 0,477 | 0,471 | 0,466 |
| 16   | 0,460 | 0,454 | 0,449 | 0,444 |
| 17   | 0,438 | 0,433 | 0,428 | 0,423 |
| 18   | 0,417 | 0,412 | 0,407 | 0,402 |
| 19   | 0,398 | 0,393 | 0,388 | 0,383 |
| 20   | 0,379 | 0,374 | 0,370 | 0,365 |
| 21   | 0,361 | 0,356 | 0,352 | 0,348 |
| 22   | 0,344 | 0,340 | 0,335 | 0,331 |
| 23   | 0,327 | 0,323 | 0,320 | 0,316 |
| 24   | 0,312 | 0,308 | 0,304 | 0,301 |
| 25   | 0,297 | 0,294 | 0,290 | 0,287 |
| 26   | 0,283 | 0,280 | 0,276 | 0,273 |
| 27   | 0,270 | 0,266 | 0,263 | 0,260 |
| 28   | 0,257 | 0,254 | 0,251 | 0,248 |
| 29   | 0,245 | 0,242 | 0,239 | 0,236 |
| 30   | 0,233 |       | 0,227 |       |
| 31   | 0,222 |       | 0,217 |       |
| 32   | 0,212 |       | 0,206 |       |
| 33   | 0,201 |       | 0,197 |       |
| 34   | 0,192 |       | 0,187 |       |
| 35   | 0,183 |       | 0,178 |       |
| 36   | 0,174 |       | 0,170 |       |
| 37   | 0,166 |       | 0,162 |       |
| 38   | 0,158 |       | 0,154 |       |
| 39   | 0,151 |       | 0,147 |       |
| 40   | 0,143 |       | 0,140 |       |
| 41   | 0,137 |       | 0,133 |       |
| 42   | 0,130 |       | 0,127 |       |
| 43   | 0,124 |       | 0,121 |       |
| 44   | 0,118 |       | 0,115 |       |

Tab. 12. Abfallcharakteristik für Schwefel-35

[11]

Halbwertszeit = 87,1 Tage

| Tage | 0,0   | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0    | ...   | 0,992 | 0,984 | 0,976 | 0,968 |
| 5    | 0,961 | 0,953 | 0,945 | 0,938 | 0,930 |
| 10   | 0,923 | 0,916 | 0,908 | 0,901 | 0,894 |
| 15   | 0,887 | 0,880 | 0,873 | 0,866 | 0,859 |
| 20   | 0,852 | 0,846 | 0,839 | 0,832 | 0,826 |
| 25   | 0,819 | 0,812 | 0,806 | 0,800 | 0,793 |
| 30   | 0,787 | 0,781 | 0,775 | 0,768 | 0,762 |
| 35   | 0,756 | 0,750 | 0,744 | 0,738 | 0,733 |
| 40   | 0,727 | 0,721 | 0,715 | 0,710 | 0,704 |
| 45   | 0,698 | 0,693 | 0,688 | 0,682 | 0,676 |
| 50   | 0,671 | 0,666 | 0,660 | 0,655 | 0,650 |
| 55   | 0,645 | 0,640 | 0,635 | 0,630 | 0,625 |
| 60   | 0,620 | 0,615 | 0,610 | 0,605 | 0,600 |
| 65   | 0,595 | 0,591 | 0,586 | 0,581 | 0,577 |
| 70   | 0,572 | 0,568 | 0,563 | 0,559 | 0,554 |
| 75   | 0,550 | 0,545 | 0,541 | 0,537 | 0,533 |
| 80   | 0,528 | 0,524 | 0,520 | 0,516 | 0,512 |
| 85   | 0,508 | 0,504 | 0,500 | 0,496 | 0,492 |
| 90   | 0,488 | 0,484 | 0,480 | 0,476 | 0,472 |
| 95   | 0,469 | 0,465 | 0,461 | 0,458 | 0,454 |
| 100  | 0,450 | 0,447 | 0,443 | 0,440 | 0,436 |
| 105  | 0,433 | 0,429 | 0,426 | 0,423 | 0,419 |
| 110  | 0,416 | 0,413 | 0,409 | 0,406 | 0,403 |
| 115  | 0,400 | 0,396 | 0,393 | 0,390 | 0,387 |
| 120  | 0,384 | 0,381 | 0,378 | 0,375 | 0,372 |
| 125  | 0,369 | 0,366 | 0,363 | 0,360 | 0,357 |
| 130  | 0,355 | 0,352 | 0,349 | 0,346 | 0,343 |
| 135  | 0,341 | 0,338 | 0,335 | 0,333 | 0,330 |
| 140  | 0,327 | 0,325 | 0,322 | 0,320 | 0,317 |
| 145  | 0,315 | 0,312 | 0,310 | 0,307 | 0,305 |
| 150  | 0,302 | 0,300 | 0,297 | 0,295 | 0,293 |
| 155  | 0,290 | 0,288 | 0,286 | 0,284 | 0,281 |
| 160  | 0,279 | 0,277 | 0,275 | 0,273 | 0,270 |
| 165  | 0,268 | 0,266 | 0,264 | 0,262 | 0,260 |
| 170  | 0,258 | 0,256 | 0,254 | 0,252 | 0,250 |
| 175  | 0,248 | 0,246 | 0,244 | 0,242 | 0,240 |
| 180  | 0,238 | 0,236 | 0,234 | 0,232 | 0,230 |
| 185  | 0,229 | 0,227 | 0,225 | 0,223 | 0,221 |
| 190  | 0,220 | 0,218 | 0,216 | 0,214 | 0,213 |
| 195  | 0,211 | 0,209 | 0,208 | 0,206 | 0,204 |
| 200  | 0,203 | 0,201 | 0,200 | 0,198 | 0,196 |
| 205  | 0,195 | 0,193 | 0,192 | 0,190 | 0,189 |
| 210  | 0,187 | 0,186 | 0,184 | 0,183 | 0,181 |
| 215  | 0,180 | 0,178 | 0,177 | 0,176 | 0,174 |
| 220  | 0,173 | 0,172 | 0,170 | 0,169 | 0,167 |

Tab. 13. Abfallcharakteristik für Kalium-42

[11]

Halbwertszeit = 12,4 Std.

| min  | 0     | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Std. |       |       |       |       |       |       |
| 0    | ...   | 0,981 | 0,963 | 0,945 | 0,928 | 0,911 |
| 2    | 0,894 | 0,877 | 0,861 | 0,845 | 0,829 | 0,814 |
| 4    | 0,799 | 0,784 | 0,770 | 0,756 | 0,742 | 0,728 |
| 6    | 0,715 | 0,701 | 0,688 | 0,676 | 0,663 | 0,651 |
| 8    | 0,639 | 0,627 | 0,615 | 0,604 | 0,593 | 0,582 |
| 10   | 0,571 | 0,561 | 0,550 | 0,540 | 0,530 | 0,520 |
| 12   | 0,511 | 0,501 | 0,492 | 0,483 | 0,474 | 0,465 |
| 14   | 0,457 | 0,448 | 0,440 | 0,432 | 0,424 | 0,416 |
| 16   | 0,408 | 0,401 | 0,393 | 0,386 | 0,379 | 0,372 |
| 18   | 0,365 | 0,358 | 0,352 | 0,345 | 0,339 | 0,333 |
| 20   | 0,326 | 0,320 | 0,314 | 0,309 | 0,303 | 0,297 |
| 22   | 0,292 | 0,286 | 0,281 | 0,276 | 0,271 | 0,266 |
| 24   | 0,261 | 0,256 | 0,251 | 0,247 | 0,242 | 0,238 |
| 26   | 0,233 | 0,229 | 0,225 | 0,220 | 0,216 | 0,212 |
| 28   | 0,208 | 0,205 | 0,201 | 0,197 | 0,193 | 0,190 |
| 30   | 0,186 | 0,183 | 0,180 | 0,176 | 0,173 | 0,170 |
| 32   | 0,167 | 0,164 | 0,160 | 0,158 | 0,155 | 0,152 |
| 34   | 0,149 | 0,146 | 0,143 | 0,141 | 0,138 | 0,136 |
| 36   | 0,133 | 0,131 | 0,128 | 0,126 | 0,124 | 0,121 |
| 38   | 0,119 | 0,117 | 0,115 | 0,112 | 0,110 | 0,108 |
| 40   | 0,106 | 0,104 | 0,102 | 0,101 | 0,099 | 0,097 |

Tab. 14. Abfallcharakteristik für Calcium-45

[11]

Halbwertszeit = 152 Tage

| Tage | 0     | 2     | 4     | 6     | 8     |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0    | ...   | 0,991 | 0,982 | 0,973 | 0,964 |
| 10   | 0,955 | 0,946 | 0,937 | 0,928 | 0,920 |
| 20   | 0,912 | 0,904 | 0,896 | 0,888 | 0,879 |
| 30   | 0,871 | 0,863 | 0,855 | 0,847 | 0,839 |
| 40   | 0,832 | 0,824 | 0,816 | 0,809 | 0,802 |
| 50   | 0,794 | 0,787 | 0,779 | 0,772 | 0,765 |
| 60   | 0,758 | 0,751 | 0,744 | 0,737 | 0,731 |
| 70   | 0,724 | 0,717 | 0,711 | 0,704 | 0,697 |
| 80   | 0,691 | 0,685 | 0,679 | 0,672 | 0,666 |
| 90   | 0,660 | 0,654 | 0,648 | 0,642 | 0,636 |
| 100  | 0,630 | 0,624 | 0,619 | 0,613 | 0,608 |
| 110  | 0,602 | 0,597 | 0,591 | 0,586 | 0,580 |
| 120  | 0,575 | 0,570 | 0,565 | 0,559 | 0,554 |
| 130  | 0,549 | 0,544 | 0,539 | 0,534 | 0,530 |
| 140  | 0,525 | 0,521 | 0,516 | 0,512 | 0,507 |
| 150  | 0,502 | 0,498 | 0,493 | 0,488 | 0,483 |
| 160  | 0,478 | 0,474 | 0,469 | 0,465 | 0,460 |
| 170  | 0,456 | 0,452 | 0,448 | 0,444 | 0,440 |
| 180  | 0,436 | 0,432 | 0,428 | 0,424 | 0,420 |
| 190  | 0,417 | 0,413 | 0,409 | 0,405 | 0,401 |
| 200  | 0,398 | 0,394 | 0,390 | 0,387 | 0,384 |
| 210  | 0,380 | 0,376 | 0,373 | 0,369 | 0,366 |
| 220  | 0,363 | 0,360 | 0,356 | 0,353 | 0,349 |
| 230  | 0,346 | 0,343 | 0,340 | 0,336 | 0,333 |
| 240  | 0,330 | 0,327 | 0,324 | 0,321 | 0,318 |
| 250  | 0,316 | 0,313 | 0,310 | 0,308 | 0,305 |
| 260  | 0,302 | 0,300 | 0,297 | 0,294 | 0,291 |
| 270  | 0,288 | 0,285 | 0,283 | 0,280 | 0,278 |
| 280  | 0,275 | 0,273 | 0,271 | 0,268 | 0,265 |
| 290  | 0,262 | 0,259 | 0,257 | 0,254 | 0,252 |
| 300  | 0,250 | 0,248 | 0,245 | 0,243 | 0,241 |
| 310  | 0,239 | 0,237 | 0,234 | 0,232 | 0,230 |
| 320  | 0,228 | 0,226 | 0,224 | 0,222 | 0,220 |
| 330  | 0,218 | 0,216 | 0,214 | 0,212 | 0,210 |
| 340  | 0,208 | 0,206 | 0,205 | 0,203 | 0,201 |
| 350  | 0,199 | 0,197 | 0,196 | 0,194 | 0,192 |
| 360  | 0,190 | 0,188 | 0,187 | 0,185 | 0,183 |
| 370  | 0,182 | 0,180 | 0,178 | 0,177 | 0,175 |
| 380  | 0,173 | 0,171 | 0,170 | 0,168 | 0,167 |
| 390  | 0,165 | 0,163 | 0,162 | 0,160 | 0,159 |
| 400  | 0,158 | 0,157 | 0,155 | 0,153 | 0,152 |
| 410  | 0,151 | 0,150 | 0,149 | 0,147 | 0,146 |
| 420  | 0,144 | 0,142 | 0,140 | 0,139 | 0,138 |
| 430  | 0,137 | 0,135 | 0,134 | 0,133 | 0,132 |
| 440  | 0,131 | 0,130 | 0,129 | 0,128 | 0,127 |

Tab. 15. Abfallcharakteristik für Caesium-137

[11]

Halbwertszeit = 33 Jahre

| Jahre | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0     | ...   | 0,979 | 0,959 | 0,939 | 0,919 |
| 5     | 0,900 | 0,881 | 0,863 | 0,845 | 0,827 |
| 10    | 0,810 | 0,793 | 0,777 | 0,761 | 0,745 |
| 15    | 0,730 | 0,715 | 0,700 | 0,685 | 0,671 |
| 20    | 0,657 | 0,644 | 0,631 | 0,618 | 0,605 |
| 25    | 0,592 | 0,580 | 0,568 | 0,556 | 0,544 |
| 30    | 0,532 | 0,521 | 0,510 | 0,500 | 0,489 |
| 35    | 0,479 | 0,469 | 0,460 | 0,450 | 0,441 |
| 40    | 0,432 | 0,423 | 0,414 | 0,405 | 0,397 |
| 45    | 0,389 | 0,381 | 0,373 | 0,365 | 0,357 |
| 50    | 0,350 | 0,343 | 0,336 | 0,329 | 0,322 |
| 55    | 0,315 | 0,308 | 0,302 | 0,296 | 0,290 |
| 60    | 0,284 | 0,278 | 0,273 | 0,268 | 0,262 |
| 65    | 0,256 | 0,250 | 0,245 | 0,240 | 0,235 |
| 70    | 0,230 | 0,225 | 0,221 | 0,216 | 0,211 |
| 75    | 0,207 | 0,202 | 0,198 | 0,192 | 0,188 |
| 80    | 0,186 | 0,182 | 0,179 | 0,175 | 0,171 |
| 85    | 0,168 | 0,164 | 0,161 | 0,158 | 0,154 |
| 90    | 0,151 | 0,148 | 0,145 | 0,142 | 0,139 |
| 95    | 0,136 | 0,133 | 0,131 | 0,128 | 0,126 |
| 100   | 0,123 | 0,120 | 0,117 | 0,115 | 0,112 |
| 105   | 0,110 | 0,108 | 0,106 | 0,104 | 0,102 |

Tab. 16. Abfallcharakteristik für Eisen-59

[11]

Halbwertszeit = 45,1 Tage

| Std.<br>Tage | 0     | 24<br>1 | 48<br>2 | 72<br>3 | 96<br>4 |
|--------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 0            | ...   | 0,985   | 0,970   | 0,955   | 0,940   |
| 5            | 0,926 | 0,912   | 0,898   | 0,884   | 0,871   |
| 10           | 0,858 | 0,845   | 0,832   | 0,819   | 0,806   |
| 15           | 0,794 | 0,782   | 0,770   | 0,758   | 0,746   |
| 20           | 0,734 | 0,723   | 0,712   | 0,702   | 0,691   |
| 25           | 0,680 | 0,670   | 0,660   | 0,650   | 0,640   |
| 30           | 0,630 | 0,621   | 0,612   | 0,602   | 0,593   |
| 35           | 0,584 | 0,575   | 0,566   | 0,557   | 0,549   |
| 40           | 0,540 | 0,532   | 0,524   | 0,516   | 0,508   |
| 45           | 0,501 | 0,493   | 0,486   | 0,479   | 0,471   |
| 50           | 0,464 | 0,457   | 0,450   | 0,443   | 0,436   |
| 55           | 0,430 | 0,424   | 0,417   | 0,411   | 0,404   |
| 60           | 0,398 | 0,392   | 0,386   | 0,380   | 0,375   |
| 65           | 0,369 | 0,364   | 0,358   | 0,353   | 0,347   |
| 70           | 0,342 | 0,336   | 0,331   | 0,325   | 0,320   |
| 75           | 0,315 | 0,310   | 0,305   | 0,301   | 0,296   |
| 80           | 0,292 | 0,287   | 0,283   | 0,279   | 0,275   |
| 85           | 0,271 | 0,267   | 0,263   | 0,259   | 0,255   |
| 90           | 0,251 | 0,247   | 0,243   | 0,239   | 0,236   |
| 95           | 0,232 | 0,229   | 0,225   | 0,222   | 0,218   |
| 100          | 0,215 | 0,211   | 0,208   | 0,205   | 0,202   |
| 105          | 0,199 | 0,196   | 0,193   | 0,190   | 0,187   |
| 110          | 0,184 | 0,181   | 0,179   | 0,176   | 0,173   |
| 115          | 0,170 | 0,168   | 0,165   | 0,163   | 0,160   |
| 120          | 0,158 | 0,155   | 0,153   | 0,151   | 0,149   |
| 125          | 0,146 | 0,144   | 0,142   | 0,140   | 0,138   |
| 130          | 0,136 | 0,134   | 0,132   | 0,130   | 0,128   |
| 135          | 0,126 | 0,124   | 0,122   | 0,120   | 0,118   |
| 140          | 0,117 | 0,115   | 0,113   | 0,111   | 0,110   |
| 145          | 0,108 | 0,106   | 0,104   | 0,103   | 0,101   |

Tab. 17. Abfallcharakteristik für Kobalt-60

[11]

Halbwertszeit = 5,3 Jahre

| Tage | 0     | 40    | 80    | 120   | 160   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0    | ...   | 0,985 | 0,971 | 0,957 | 0,944 |
| 200  | 0,930 | 0,917 | 0,904 | 0,891 | 0,879 |
| 400  | 0,866 | 0,854 | 0,842 | 0,830 | 0,818 |
| 600  | 0,806 | 0,795 | 0,783 | 0,772 | 0,761 |
| 800  | 0,750 | 0,740 | 0,729 | 0,719 | 0,708 |
| 1000 | 0,698 | 0,688 | 0,679 | 0,669 | 0,659 |
| 1200 | 0,650 | 0,641 | 0,632 | 0,623 | 0,614 |
| 1400 | 0,605 | 0,596 | 0,588 | 0,580 | 0,571 |
| 1600 | 0,563 | 0,555 | 0,547 | 0,539 | 0,532 |
| 1800 | 0,524 | 0,517 | 0,509 | 0,502 | 0,495 |
| 2000 | 0,488 | 0,481 | 0,474 | 0,467 | 0,461 |
| 2200 | 0,454 | 0,448 | 0,441 | 0,435 | 0,429 |
| 2400 | 0,423 | 0,417 | 0,411 | 0,405 | 0,399 |
| 2600 | 0,393 | 0,388 | 0,382 | 0,377 | 0,372 |
| 2800 | 0,366 | 0,361 | 0,356 | 0,351 | 0,346 |
| 3000 | 0,341 | 0,336 | 0,331 | 0,327 | 0,322 |
| 3200 | 0,317 | 0,313 | 0,308 | 0,304 | 0,300 |
| 3400 | 0,295 | 0,291 | 0,287 | 0,283 | 0,279 |
| 3600 | 0,275 | 0,271 | 0,267 | 0,263 | 0,259 |
| 3800 | 0,256 | 0,252 | 0,249 | 0,245 | 0,242 |
| 4000 | 0,238 | 0,235 | 0,231 | 0,228 | 0,225 |
| 4200 | 0,222 | 0,218 | 0,215 | 0,212 | 0,209 |
| 4400 | 0,206 | 0,203 | 0,200 | 0,198 | 0,195 |
| 4600 | 0,192 | 0,189 | 0,187 | 0,184 | 0,181 |
| 4800 | 0,179 | 0,176 | 0,174 | 0,171 | 0,169 |
| 5000 | 0,166 | 0,164 | 0,162 | 0,159 | 0,157 |
| 5200 | 0,155 | 0,153 | 0,150 | 0,148 | 0,146 |
| 5400 | 0,144 | 0,142 | 0,140 | 0,138 | 0,136 |
| 5600 | 0,134 | 0,132 | 0,130 | 0,128 | 0,127 |
| 5800 | 0,125 | 0,123 | 0,121 | 0,119 | 0,118 |
| 6000 | 0,116 | 0,114 | 0,113 | 0,111 | 0,110 |
| 6200 | 0,108 | 0,106 | 0,105 | 0,103 | 0,102 |
| 6400 | 0,100 | 0,099 | 0,097 | 0,096 | 0,094 |

Tab. 18. Abfallcharakteristik für Kupfer-64

[11]

Halbwertszeit = 12,8 Std.

| min. | 0     | 15    | 30    | 45    |
|------|-------|-------|-------|-------|
| Std. |       |       |       |       |
| 0    | ...   | 0,986 | 0,973 | 0,960 |
| 1    | 0,947 | 0,934 | 0,922 | 0,909 |
| 2    | 0,897 | 0,885 | 0,873 | 0,861 |
| 3    | 0,850 | 0,838 | 0,827 | 0,816 |
| 4    | 0,805 | 0,794 | 0,783 | 0,773 |
| 5    | 0,762 | 0,752 | 0,742 | 0,732 |
| 6    | 0,722 | 0,712 | 0,703 | 0,693 |
| 7    | 0,684 | 0,675 | 0,666 | 0,657 |
| 8    | 0,648 | 0,639 | 0,631 | 0,622 |
| 9    | 0,614 | 0,605 | 0,597 | 0,589 |
| 10   | 0,581 | 0,574 | 0,566 | 0,558 |
| 11   | 0,551 | 0,543 | 0,536 | 0,529 |
| 12   | 0,522 | 0,515 | 0,508 | 0,501 |
| 13   | 0,494 | 0,487 | 0,481 | 0,474 |
| 14   | 0,468 | 0,462 | 0,456 | 0,449 |
| 15   | 0,443 | 0,437 | 0,431 | 0,426 |
| 16   | 0,420 | 0,414 | 0,409 | 0,403 |
| 17   | 0,398 | 0,392 | 0,387 | 0,382 |
| 18   | 0,377 | 0,372 | 0,367 | 0,362 |
| 19   | 0,357 | 0,352 | 0,347 | 0,343 |
| 20   | 0,338 | 0,334 | 0,329 | 0,325 |
| 21   | 0,320 | 0,316 | 0,312 | 0,307 |
| 22   | 0,303 | 0,299 | 0,295 | 0,291 |
| 23   | 0,287 | 0,283 | 0,280 | 0,276 |
| 24   | 0,272 | 0,268 | 0,265 | 0,261 |
| 25   | 0,258 | 0,254 | 0,251 | 0,247 |
| 26   | 0,244 | 0,241 | 0,238 | 0,234 |
| 27   | 0,231 | 0,228 | 0,225 | 0,222 |
| 28   | 0,219 | 0,216 | 0,213 | 0,210 |
| 29   | 0,207 | 0,205 | 0,202 | 0,199 |
| 30   | 0,197 | 0,194 | 0,191 | 0,189 |
| 31   | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 |
| 32   | 0,176 | 0,174 | 0,172 | 0,169 |
| 33   | 0,167 | 0,165 | 0,162 | 0,160 |
| 34   | 0,158 | 0,156 | 0,154 | 0,152 |
| 35   | 0,150 | 0,148 | 0,146 | 0,144 |
| 36   | 0,142 | 0,140 | 0,138 | 0,136 |
| 37   | 0,134 | 0,133 | 0,131 | 0,129 |
| 38   | 0,127 | 0,126 | 0,124 | 0,122 |
| 39   | 0,121 | 0,119 | 0,117 | 0,116 |
| 40   | 0,114 | 0,113 | 0,111 | 0,110 |
| 41   | 0,108 | 0,107 | 0,105 | 0,104 |
| 42   | 0,102 | 0,101 | 0,100 | 0,098 |

Tab. 19. Abfallcharakteristik für Zink-65

[11]

Halbwertszeit = 250 Tage

| Tage | 0     | 4     | 8     | 12    | 16    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0    | ...   | 0,989 | 0,978 | 0,967 | 0,956 |
| 20   | 0,946 | 0,935 | 0,925 | 0,915 | 0,905 |
| 40   | 0,895 | 0,885 | 0,875 | 0,865 | 0,856 |
| 60   | 0,846 | 0,837 | 0,828 | 0,819 | 0,810 |
| 80   | 0,801 | 0,792 | 0,783 | 0,774 | 0,766 |
| 100  | 0,757 | 0,749 | 0,741 | 0,733 | 0,725 |
| 120  | 0,717 | 0,709 | 0,701 | 0,693 | 0,685 |
| 140  | 0,678 | 0,670 | 0,663 | 0,656 | 0,648 |
| 160  | 0,641 | 0,634 | 0,627 | 0,620 | 0,613 |
| 180  | 0,607 | 0,600 | 0,593 | 0,587 | 0,580 |
| 200  | 0,574 | 0,568 | 0,561 | 0,555 | 0,549 |
| 220  | 0,543 | 0,537 | 0,531 | 0,525 | 0,519 |
| 240  | 0,514 | 0,508 | 0,502 | 0,497 | 0,491 |
| 260  | 0,486 | 0,481 | 0,475 | 0,470 | 0,465 |
| 280  | 0,460 | 0,455 | 0,450 | 0,445 | 0,440 |
| 300  | 0,435 | 0,430 | 0,425 | 0,421 | 0,416 |
| 320  | 0,411 | 0,407 | 0,402 | 0,398 | 0,393 |
| 340  | 0,389 | 0,385 | 0,381 | 0,376 | 0,372 |
| 360  | 0,368 | 0,364 | 0,360 | 0,356 | 0,352 |
| 380  | 0,348 | 0,344 | 0,341 | 0,337 | 0,333 |
| 400  | 0,329 | 0,326 | 0,322 | 0,319 | 0,315 |
| 420  | 0,312 | 0,308 | 0,305 | 0,301 | 0,298 |
| 440  | 0,295 | 0,292 | 0,288 | 0,285 | 0,282 |
| 460  | 0,279 | 0,276 | 0,273 | 0,270 | 0,267 |
| 480  | 0,264 | 0,261 | 0,258 | 0,255 | 0,252 |
| 500  | 0,250 | 0,247 | 0,244 | 0,241 | 0,239 |
| 520  | 0,236 | 0,233 | 0,231 | 0,228 | 0,226 |
| 540  | 0,223 | 0,221 | 0,218 | 0,216 | 0,214 |
| 560  | 0,211 | 0,209 | 0,207 | 0,204 | 0,202 |
| 580  | 0,200 | 0,198 | 0,195 | 0,193 | 0,191 |
| 600  | 0,189 | 0,187 | 0,185 | 0,183 | 0,181 |
| 620  | 0,179 | 0,177 | 0,175 | 0,173 | 0,171 |
| 640  | 0,169 | 0,167 | 0,165 | 0,164 | 0,162 |
| 660  | 0,160 | 0,158 | 0,156 | 0,155 | 0,153 |
| 680  | 0,151 | 0,150 | 0,148 | 0,146 | 0,145 |
| 700  | 0,143 | 0,142 | 0,140 | 0,138 | 0,137 |
| 720  | 0,135 | 0,134 | 0,132 | 0,131 | 0,130 |
| 740  | 0,128 | 0,127 | 0,125 | 0,124 | 0,122 |
| 760  | 0,121 | 0,120 | 0,118 | 0,117 | 0,116 |
| 780  | 0,115 | 0,113 | 0,112 | 0,111 | 0,110 |
| 800  | 0,108 | 0,107 | 0,106 | 0,105 | 0,104 |
| 820  | 0,103 | 0,101 | 0,100 | 0,099 | 0,098 |