

Nuklearmedizin Funktions- diagnostik

Herausgegeben von

Dieter Emrich

123 Abbildungen, 64 Tabellen



Georg Thieme Verlag
Stuttgart

Bearbeitet von

K.-H. Bremer, Frankfurt/M.
D. Emrich, Göttingen
U. Feine, Tübingen
H. Frerichs, Göttingen
W. Gelbke, Göttingen
H. Heimpel, Ulm
R.-D. Hesch, Göttingen
P. Hilpert, Tübingen
G. Hör, München
G. Hoffmann, Freiburg
H. J. Karl, München
N. Kleine, Freiburg
G. Kloss, Frankfurt/M.
H. Koblet, Zürich
A. v. zur Mühlen, Göttingen
E. Oberhausen, Homburg
H. W. Pabst, München
P. Pfannenstiel, Wiesbaden
W. Schoeppe, Frankfurt/M.
C. G. Winkler, Bonn
F. Wolf, Erlangen

Nuklearmedizin Funktionsdiagnostik

Herausgegeben von **Dieter Emrich**

Bearbeitet von	K.-H. Bremer, Frankfurt/M.	N. Kleine, Freiburg
	D. Emrich, Göttingen	G. Kloss, Frankfurt/M.
	U. Feine, Tübingen	H. Koblet, Zürich
	H. Frerichs, Göttingen	A. v. zur Mühlen, Göttingen
	W. Gelbke, Göttingen	E. Oberhausen, Homburg
	H. Heimpel, Ulm	H. W. Pabst, München
	R.-D. Hesch, Göttingen	P. Pfannenstiel, Wiesbaden
	P. Hilpert, Tübingen	W. Schoeppe, Frankfurt/M.
	G. Hör, München	C. G. Winkler, Bonn
	G. Hoffmann, Freiburg	F. Wolf, Erlangen
	H. J. Karl, München	

123 Abbildungen,
64 Tabellen

Georg Thieme Verlag
Stuttgart

Diejenigen Bezeichnungen, die zugleich eingetragene Warenzeichen sind, wurden *nicht* besonders kenntlich gemacht. Es kann also aus der Bezeichnung einer Ware mit dem für diese eingetragenen Warenzeichen nicht geschlossen werden, daß die Bezeichnung ein freier Warenname ist. Ebensowenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmuster vorliegen.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des *Werkes* darf in irgendeiner Form (durch Photokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. © Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1971 – Printed in Germany.
Satz und Druck: Paul Christian KG, 724 Horb a. N.

ISBN 3 13 461901 6

Mitarbeiterverzeichnis

Herausgeber

EMRICH, D., Prof. Dr. med., Leiter der Nuklearmedizinischen Abteilung der Medizinischen und Radiologischen Klinik der Universität Göttingen

Mitarbeiter

- BREMER, K.-H., Dr. rer. nat., Radiochemisches Laboratorium der Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt-Höchst
- FEINE, U., Prof. Dr. med., Leiter der Nuklearmedizinischen Abteilung des Medizinischen Strahleninstitutes der Universität Tübingen
- FRERICHS, H., Priv.-Doz. Dr. med., Oberarzt der Medizinischen Klinik und Poliklinik der Universität Göttingen
- GELBKE, W., Dr. rer. nat., Leiter des Zentralen Isotopenlaboratoriums der Universität Göttingen
- HEIMPEL, H., Prof. Dr. med., Leiter der Abteilung für Hämatologie und Gerinnungsforschung am Zentrum für Innere Medizin der Universität Ulm
- HESCH, R.-D., Dr. med., Nuklearmedizinische Abteilung der Medizinischen und Radiologischen Klinik der Universität Göttingen
- HILPERT, P., Priv.-Doz. Dr. med., Medizinische Klinik der Universität Tübingen
- HÖR, G., Priv.-Doz. Dr. med., Leitender Oberarzt der Nuklearmedizinischen Klinik und Poliklinik rechts der Isar der Technischen Universität München
- HOFFMANN, G., Prof. Dr. med., Leiter der Abteilung für klinische Nuklearmedizin der Medizinischen Klinik der Universität Freiburg
- KARL, H.J., Prof. Dr. med., Leitender Oberarzt der I. Medizinischen Klinik der Universität München
- KLEINE, N., Prof. Dr. rer. nat., Medizinische Klinik der Universität Freiburg
- KLOSS, G., Dr. med., Radiochemisches Laboratorium der Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt-Höchst
- KOBLET, H., Priv.-Doz. Dr. med., Institut für Medizinische Mikrobiologie, Abteilung Virologie der Universität Zürich
- VON ZUR MÜHLEN, A., Dr. med., Leiter der Arbeitsgruppe Endokrinologie der Medizinischen Klinik und Poliklinik der Universität Göttingen
- OBERHAUSEN, E., Prof. Dr. rer. nat. Dr. med., Leiter der Abteilung für Nuklearmedizin und medizinische Physik am Institut für Biophysik (Boris-Rajewsky-Institut) der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar
- PABST, H.W., Prof. Dr. med., Direktor der Nuklearmedizinischen Klinik und Poliklinik rechts der Isar der Technischen Universität München
- PFANNENSTIEL, P., Priv.-Doz. Dr. med., Sektion Nuklearmedizin der Deutschen Klinik für Diagnostik, Wiesbaden
- SCHOEPPE, W., Priv.-Doz. Dr. med., Oberarzt der Abteilung für Nephrologie am Zentrum für Innere Medizin der Universität Frankfurt/Main
- WINKLER, C. G., Prof. Dr. med., Leiter der Nuklearmedizinischen Abteilung der Chirurgischen Klinik der Universität Bonn
- WOLF, F., Prof. Dr. med., Leiter der Nuklearmedizinischen Abteilung der Medizinischen Klinik und Poliklinik der Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Vorwort

Ein wesentliches Charakteristikum biologischer Vorgänge ist ihre Dynamik. Ein entscheidendes Ziel der klinischen Diagnostik ist es, die Störungen dieser Dynamik quantitativ zu erfassen. Dabei sollen die Belastung für den Patienten und der Aufwand für den Untersucher möglichst gering sein. Der Einsatz offener Radionuklide in der klinischen Funktionsdiagnostik hat uns der Erfüllung dieser Forderungen näher gebracht, seitdem GEORG VON HEVESY in den dreißiger Jahren ihre Bedeutung für die Biologie erkannte und dafür mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Die Gewinnung künstlicher Radionuklide und die Elektronik haben in den letzten 20 Jahren große Fortschritte gemacht und damit die technischen Voraussetzungen für die Entwicklung der Nuklearmedizin geschaffen, deren jährliche Wachstumsrate mit etwa 25% angenommen werden darf.

Wie in kaum einem anderen Teilgebiet der Medizin treffen in der Nuklearmedizin Inhalt und Interesse naturwissenschaftlicher, technischer, physiologischer und klinischer Fächer zusammen. Sie ist deshalb im besonderen Maße auf Kooperation angewiesen. Das Ausmaß dieser Zusammenarbeit bestimmt die Entwicklung der Nuklearmedizin und ihre Effektivität.

Die theoretischen und methodischen Vorbedingungen machen es dem am Krankenbett tätigen Arzt häufig noch schwer, Möglichkeiten und Grenzen der nuklearmedizinischen Funktionsdiagnostik zu beurteilen. Eine hierfür notwendige Informationsquelle, die den letzten 10 Jahren Rechnung trägt, fehlte bisher im deutschen Sprachraum. Das Bewußtsein, daß im Rahmen der schnellen Entfaltung des Faches kaum ein Einzelner in der Lage sein dürfte, dieses Gebiet ausreichend darzustellen, hat den Herausgeber veranlaßt, mit einem Kreis

von Autoren einen solchen Versuch zu unternehmen. Das Buch wendet sich sowohl an direkt in der Nuklearmedizin Tätige als auch an alle, die sich über Fragen der klinischen Funktionsdiagnostik mit Radionukliden unterrichten wollen. Es gliedert sich in einen allgemeinen Teil, in dem die physikalischen, chemischen und biologischen Grundlagen der Nuklearmedizin zusammenfassend dargestellt werden. Ihm folgt ein spezieller Teil, in dem, getrennt nach Organsystemen, Methodik und Ergebnisse abgehandelt werden. Obwohl die Autoren ihren Stoff beschränkten, war eine strenge Trennung zwischen routinemäßiger Anwendung und klinischer Forschung sowie zwischen sicherer und möglicher Aussage nicht immer gegeben. Auch schienen Hinweise auf Zukünftiges im Hinblick auf die schnelle Progredienz des Faches sinnvoll. Das Buch tritt dem im gleichen Verlag erschienenen Werk über die „Szintigraphische Diagnostik“ von FEINE und ZUM WINKEL an die Seite.

Der Herausgeber hat seinen Mitautoren zu danken, denn ohne ihre Mitarbeit wäre es in dieser Form nicht möglich gewesen. Sein Dank gilt ferner den Herren Priv.-Doz. Dr. P. HEIMBURG und Prof. Dr. F. SCHELER, Göttingen, für die Unterstützung bei der Durchsicht einzelner Manuskripte und den zuständigen Mitarbeitern des Georg Thieme Verlags.

Gewidmet ist es dem Andenken an LUDWIG HEILMEYER, einem der ersten in Deutschland, der die Bedeutung der Nuklearmedizin für die Klinik erkannte, sie nutzte und förderte. So ist es kein Zufall, daß eine Reihe der Autoren ehemalige Mitarbeiter seiner Klinik sind.

Göttingen, im September 1970

DIETER EMRICH

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V	Fehler von Impulssummen und -raten	32
		Fehler des Ratemeters	33
		Digitales Ratemeter	33
		Integrierendes Ratemeter	34
		Typische Ratemeterkurven	34
		Statistischer Fehler des Ratemeter- ausschlags	34
		Verzögerung und Verformung von Rate- meterkurven	36
ALLGEMEINER TEIL			
Radioaktivität und Strahlennachweis			
Von W. GELBKE			
Die Kernstrahlung	1		
Nuklide und Isotope	1		
Arten der Kernstrahlung	2		
Gesetz des radioaktiven Zerfalls	5		
Strahlung und Materie	6		
Detektoren	9		
Zählrohre	9		
Szintillationszähler	11		
Flüssigkeitsszintillationszähler	12		
Halbleiterdetektor	12		
Praktische Hinweise	13		
Detektorkennlinien	13		
Szintillationszähler	14		
Wirkungsgrad	15		
Spektrometrie	16		
Leerwerte	17		
Rauschimpulse	17		
Sonstige Störimpulse	18		
Detektorformen und -anordnungen	19		
Kollimatoren	20		
Meßgeräte	21		
Spannungs- und Stromversorgung	21		
Verstärker	22		
Prüfimpulsgenerator	22		
Impulsformer	22		
Schaltuhr	22		
Impulssummenanzeige	23		
Koinzidenz-Antikoinzidenz-Stufe	23		
Ratemeter	23		
Digitales Ratemeter	23		
Integrierendes Ratemeter	23		
Diskriminator	24		
Totzeitregler	26		
Praktische Hinweise	26		
Impulssummenanzeige	27		
Diskriminatoranwendung	27		
Aktivitätsmessung bei γ -Doppel- markierung	28		
Geometriefaktor	29		
Funktionsdiagnostische Meßplätze	29		
Meßgenauigkeit und Fehlerrechnung	30		
Absolute und relative Aktivitätsmessung	30		
Fehlerrechnung	31		
Poisson- und Gauss-Verteilung	31		
		Radiopharmaka	
		Von K.-H. BREMER und G. KLOSS	
		Auswahlkriterien	38
		Physikalische Eigenschaften der Radio- nuklide	38
		Strahlenart	38
		Strahlenenergie	38
		Halbwertszeit	39
		Biologisches Verhalten	39
		Chemische Verbindungsform	39
		Verteilung und Ausscheidung	39
		Toxizität	40
		Herstellung	40
		Gewinnung radioaktiver Nuklide	40
		Kernumwandlungen	40
		Aktivierung im Reaktor	41
		Aktivierung im Zyklotron	41
		Aufarbeitung von Bestrahlungsproben	42
		Reinheitskriterien für Radionuklide	42
		Markierung der Präparate	43
		Chemische Umsetzungen	43
		Biosynthese	43
		Spezielle Methoden	43
		Wichtige Präparate zur Funktions- diagnostik	44
		Jodpräparate	44
		Quecksilberverbindungen	45
		Kolloidales Gold	45
		Chrompräparate	45
		Gase	45
		Biosynthetisch hergestellte Präparate	46
		Betastrahler	46
		Nuklidgeneratoren	46
		Grundlagen	46
		Spezielle Generatorsysteme	48
		Qualitätskontrolle	49
		Chemische und physikalische Reinheit	49
		Stabilität	50
		Biologische Qualitätsmerkmale	51
		Sterilität	51
		Pyrogenfreiheit	51
		Verträglichkeit und Eignung im Tier- versuch	52

Begriffe und Modelle der Radionuklid-Kinetik

Von H. KOBLET

Aussagemöglichkeiten	53
Qualitative Aussage	54
Semiquantitative Aussage	54
Quantitative Aussage	55
Begriffe und Definitionen	55
Verteilungsraum	55
Kompartiment	57
Austauschbarer Pool	57
Transfer und Transfergeschwindigkeit (Fließgleichgewicht)	58
Umsatz und Umsatzgeschwindigkeit	58
Absolute und relative Umsatzgeschwindigkeit	59
Umsatzzeit	59
Biologische Halbwertszeit	59
Mittelbarer und unmittelbarer Vorläufer	59
Isotopenverdünnung	60
Totale Clearance	60
Metabolic clearance rate	61
Die mathematische Grundformel	61
Modelle	62
Definition des Begriffs „Modell“	62
Zweck von Modellen	62
Grundlagen und Formulierung von Modellen	62
Deduktive Modelle	62
Induktive Modelle	65
Anwendungs- und Gültigkeitsbereich von Modellen	68
Systematik der Modelle	68
Steady-State-Systeme	68
Geschlossene Einkammersysteme	68
Offene Einkammersysteme	68
Offene Zweikammer- und Zweipoolsysteme	69
Komplizierte Systeme	71
Nicht-Steady-State-Systeme	71

Dosimetrie und biologische Strahlenwirkungen

Von D. EMRICH und P. PFANNENSTIEL

Dosisbegriffe	73
Physikalische Berechnungsgrundlagen	74
Biologische Berechnungsgrundlagen	75
Radiochemische Gesichtspunkte	76
Protrahierte Dosisleistung	76
Praktische Beispiele der Dosimetrie	77
Biologische Strahlenwirkungen im Diagnostikbereich	78
Zur Frage der Kanzerogenese	78
Genetische Wirkungen	79
Konsequenzen für die Praxis	80

Elektronische Datenverarbeitung in der nuklearmedizinischen Funktionsdiagnostik

Von C. G. WINKLER

Historische Entwicklung der maschinellen Datenverarbeitung	82
Aufbau und Arbeitsweise elektronischer Rechner	82
Computer-Programmierung	84
Funktionsdiagnostische Computerprogramme	85
Nuklearmedizinisches DV-Betriebssystem	94
Schlußbetrachtung	97

SPEZIELLER TEIL

Hämatologie

Von H. HEIMPEL

Allgemeine kinetische Aspekte der hämopoetischen Zellerneuerungssysteme	99
Erythrozytäres System	100
Untersuchung der Erythropoese mit radioaktivem Eisen (Ferrokinetik)	100
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	100
Nuklearmedizinische Voraussetzungen	102
Methoden	102
Plasmaeisenumsatz	102
Eisenutilisationsrate	103
Ferrokinetik in einzelnen Organen	105
Interpretation ferrokinetischer Untersuchungen	106
Klinische Bedeutung und Ergebnisse	107
Aplastische und hypoplastische Anämien	107
Anämien mit ineffektiver Erythropoese	108
Sideroachrestische Anämien	108
Hämolytische Anämien	109
Eisenmangel	110
Polyzythämie und Polyglobulie	110
Extramedulläre Erythropoese	110
Andere Erkrankungen	111
Eisenbindungskapazität	111
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	111
Methodik	112
Klinische Bedeutung und Ergebnisse	112
Blutvolumen	113
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	113
Bestimmung des Erythrozytenvolumens	113
Bestimmung des Plasmavolumens	116
Berechnung des Gesamtblutvolumens	117
Klinische Bedeutung und Ergebnisse	117
Anämie	118
Polyzythämie und Polyglobulie	118
Splenoomegalie	118

Erythrozytenlebenszeit	118	Methodik und Ergebnisse	156
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	118	Kinetischer Parameter	156
⁵¹ Cr-Methode	120	Geschwindigkeit der Radiojodaufnahme („Jodidphase“)	156
DF ³² P-Methode	122	Geschwindigkeit der Radiojodabgabe („Hormonphase“)	158
Auswertung	123	Verteilung und Umsatz radiojodmarkierter Jodaminosäuren	160
Klinische Bedeutung und Ergebnisse	125	Belastungstests	162
Lokalisation der Erythrozytendestruktion	127	Statische Parameter	165
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	127	T ₃ -Test	165
Nuklearmedizinische Voraussetzungen	127	Thyroxinbestimmung im Plasma	167
Methodik	127	Nachweis stimulierender Substanzen	168
Berechnung	128	Klinische Anwendung	170
Klinische Bedeutung und Ergebnisse	129	Euthyreote Struma	171
Simultane Anwendung von ⁵¹ Cr und ⁵⁹ Fe	130	Hyperthyreose	171
Klinische Indikationen der verschiedenen Untersuchungsverfahren	131	Hypothyreote Zustände	172
Thrombozytäres System	132	Thyreoiditis	174
Bestimmung der Thrombozytenlebenszeit	132	Struma maligna	174
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	132	Strahlenexposition	174
⁵¹ Cr-Methode	133		
DF ³² P-Methode	135	Steroidstoffwechsel	
Auswertung	135	Von H. J. KARL	
Klinische Bedeutung und Ergebnisse	135	Zur Physiologie des Steroidhormonstoffwechsels	176
Lokalisation der Thrombozyten-sequestration	136	Markierte Steroide	178
Leukozytäres System	136	Verabreichung radioaktiver Steroide	178
		Isolierung und Bestimmung von Steroiden	179
Grundlagen des radioimmunchemischen Hormonnachweises		Bindung von Steroiden an Plasmaproteine	180
Von A. VON ZUR MÜHLEN		Schwundrate und biologische Halbwertszeit von Steroiden	181
Prinzip der radioimmunchemischen Reaktion	138	Metabolische Clearancerate von Steroiden	181
Gewinnung von Antikörpern gegen Proteohormone	139	Sekretionsrate von Steroiden	182
Markierung von Proteohormonen	140	Produktionsrate von Steroiden	184
Die radioimmunchemische Reaktion	142	Strahlenbelastung	186
Auswertung der Meßergebnisse	144		
Anwendung des radioimmunchemischen Hormonnachweises	146	Funktionsprüfung des endokrinen Pankreas	
Jodstoffwechsel		Von H. FRERICHS	
Von D. EMRICH		Morphologie und Physiologie der Langerhans-Inseln	187
Physiologie und Biochemie des Jodstoffwechsels	148	Methodik der Seruminsulinbestimmung	189
Jodresorption und thyreoidale Jodanreicherung	148	Biologische Nachweisverfahren	189
Inkretion und Transport	150	Radioimmunchemische Insulinbestimmung	191
Abbau und Ausscheidung	151	Klinische Bedeutung	194
Regulation	151	Insulin im Nüchternserum	194
Voraussetzungen für nuklearmedizinische Untersuchungen	152	Seruminsulin nach Belastung mit Glukose	194
Radioaktive Isotope und markierte Verbindungen	152	Seruminsulin nach Injektion von Glukagon, Aminosäuren oder Sulfonylharnstoffderivaten	197
Meßmethoden	153	Insulin in Liquor und Urin. Insulin-clearance	198
Die Bedeutung der Radiojodstoffwechselkinetik für klinische Funktionsuntersuchungen	154	Klinische Bedeutung der immunchemischen Bestimmung von Glukagon	198
		Bestimmung insulinbindender Serumantikörper	199

Kardiologie und Angiologie

Von G. HOFFMANN und N. KLEINE

Methoden in der Kardiologie	201
Herzzeitvolumen	201
Kontraktionsgeschwindigkeit	206
Koronardurchströmung	209
Methoden zur Messung der Durchblutung	210
Organdurchblutung	210
Periphere Durchblutung	210
Hirndurchblutung	213

Pneumologie

Von U. FEINE und P. HILPERT

Physiologische Grundlagen	214
Radiopharmaka	218
Radioaktive Gase	218
Radioaktiv markierte Partikel	220
Methodik	220
Gasmethoden	220
Verteilung der Ventilation	220
Verteilung der Perfusion	224
Untersuchungen mit der Szintillationskamera	226
Methoden mit radioaktiv markierten Partikeln	230
Perfusionsszintigraphie	230
Inhalationsszintigraphie	233
Strahlenbelastung	233
Schlußbetrachtung	234

Gastroenterologie

Von F. WOLF

Nuklearmedizinische Voraussetzungen	235
Radiopharmaka	235
Apparative Ausrüstung	235

Untersuchungen der Resorption und

Exsudation	236
Physiologische und pathophysiologische Bemerkungen	236
Methodik und Ergebnisse	237
Allgemeine Methodik	237
Fäzes-Exkretions-Untersuchung	238
Blut- oder Plasmaaktivitätsmessung	239
Doppelmarkierung	239
Untersuchung von Stuhleinzelpuben	239
Ganzkörperzähler	239
Exhalationsmessung	240
Anwendung kinetischer Analog- oder Digitalmodelle	240
Spezielle Methodik	240
Untersuchung der Resorption	240
Eisen und Schwermetalle	240
Fette	241
Eiweiß und Aminosäuren	243
Kohlenhydrate	244

Elektrolyte, besonders Kalium und Calcium	244
Vitamin B ₁₂	244

Markierte Leitsubstanzen als Hilfsmittel bei Bilanzuntersuchungen und chemischen Sekretionsanalysen	246
Untersuchung der Exsudation	247
Eiweißausscheidung	247
Blutverlust	248

Untersuchungen der Leber	249
Physiologische Voraussetzungen	249
Spezielle Methodik und Ergebnisse	250
Untersuchung der Leberdurchblutung	250
Clearancemethoden	250
Weitere Untersuchungsverfahren zur Beurteilung der enteroportaln Durchblutungsverhältnisse	253
Untersuchung der exkretorischen Leberfunktion	255

Weitere Untersuchungsmethoden in der Gastroenterologie	258
--	-----

Wasser- und Elektrolythaushalt

Von W. SCHÖPPE

unter Mitarbeit von R.-D. HESCH

Körperwasser	261
Extrazelluläres Wasser	262
Natrium	264
Kalium	266
Bestimmung des Gesamtkörperkaliums mit ⁸⁶ Rubidium	266
Calcium	269
Bestimmung der Calciumabsorption	269
Sekretion und Exkretion von Calcium im Darm	270
Kinetische Studien	270
Magnesium	272
Beziehungen zwischen Elektrolyten und Körperkompartimenten	272

Nephrologie

Von H. W. PABST und G. HÖR

Nephrographie mit Radioisotopen	275
Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen; Auswertung	275
Methodik	279
Nuklearmedizinische Voraussetzungen	279
Radiopharmaka	279
Prinzipien der Meßmethodik	280
Vorbereitung des Patienten und technische Durchführung	281
Fehlerquellen	282
Variationsmöglichkeiten	282
Klinische Anwendung	283
Vorwiegend einseitige Nierenerkrankungen	283
Vorwiegend doppelseitige Nierenerkrankungen	286

Extrarenal bedingte Nierenfunktionsstörungen	287	Derzeitiger klinisch-diagnostischer Wert der indirekten Totalclearance	308
Kombination der Radioisotopennephrographie mit anderen nuklearmedizinischen Methoden zur Nierenfunktionsuntersuchung	287	Vergleich zwischen Standard-Inulin-Clearance und indirekter ^{131}J -Inulin-clearance	308
Radioisotopennephrographie und -zystographie im Vergleich und zur Ergänzung radiologischer und klinischer Untersuchungsmethoden	288	Seitengetrennte Nierenfunktionsdiagnostik Radionuklid-Clearance-Methoden zur selektiven, quantitativen Bestimmung der Nierendurchblutung	310
Radioisotopennephrographie, -zystographie und nuklearmedizinische Clearance in der Pädiatrie	289	Physiologische und pathophysiologische Voraussetzungen	310
Refluxdiagnostik mit Radionukliden	292	Technik und Berechnung der renalen ^{133}Xe -Clearance	311
Strahlenexposition	293	Klinische Anwendungsmöglichkeiten	312
Clearancebestimmung mit Radionukliden	293	Andere Methoden zur Bestimmung der Nierendurchblutung bzw. deren Seitendifferenzen	312
Einzeit-Clearance	293	Strahlenbelastung	312
Physiologische und pathophysiologische Bemerkungen	293	Die Verwendung von Ganzkörperzählern	
Kritik der Einzeit-(slope-) Clearance	295	Von E. OBERHAUSEN	
Nuklearmedizinische Voraussetzungen	296	Aufbau von Ganzkörperzählern	313
Radiopharmaka	296	Detektoren	313
modifizierte Techniken	298	Abschirmung	314
Bisherige Anwendungsmöglichkeiten in der Klinik	298	Elektronik	315
Renale Clearancebestimmungen	298	Meßgeometrien und Klassifizierung von Ganzkörperzählern	315
Physiologische und pathophysiologische Bemerkungen	298	Anwendung von Ganzkörperzählern	317
Nuklearmedizinische Voraussetzungen	300	Retentionsmessungen	317
Radiopharmaka	300	Resorptionsmessungen	318
Meßmethodik und technische Durchführung	301	Bestimmung des Gesamtgehalts von wichtigen Elektrolyten und von Verteilungsräumen	318
Klinische Anwendungsmöglichkeiten und Begrenzungen	303	Messungen bei Abschirmung verschiedener Organbereiche	321
Vergleich mit Standard-Clearance-Verfahren	303	Bestimmung des Umsatzes der Schilddrüsenhormone und des extrathyreoidalen ^{131}J	322
Anwendungsmöglichkeiten bei tubulären Störungen	306	Bestimmung der Nierenclearance	323
Anwendungsmöglichkeiten bei glomerulären Störungen	306		
Vorteile und limitierende Faktoren	306	ANHANG	
Indirekte Clearance unter Infusionsbedingungen	307	Kernphysikalische Daten, Tabellen	325
Physiologische und pathophysiologische Bemerkungen	307	Literaturverzeichnis	339
Nuklearmedizinische Voraussetzungen	307	Sachverzeichnis	361
Radiopharmaka	308		
Methodik	308		

Radioaktivität und Strahlennachweis

Von W. GELBKE

Die Kernstrahlung

Die Radioaktivität, ob natürlichen Ursprungs oder durch Beschuß mit energiereichen Partikeln künstlich erzeugt, besteht in einer selbständigen Umwandlung der Atomkerne, nämlich dem Übergang von einem labilen bzw. angeregten in einen stabilen Grundzustand, der zumeist von der Emission einer *Strahlung* begleitet ist. Diese kann aus geladenen materiellen *Elementarteilchen* (α = Heliumkernen, β = Elektronen, β^+ = Positronen) oder elektromagnetischen *Quanten* (γ -Strahlung) bestehen, zumeist einer Kombination von beidem. Jeder radioaktive Kern kann diesen Vorgang, den man unzutreffend als „Zerfall“ bezeichnet, nur einmal durchmachen. Der Zeitpunkt läßt sich nicht vorhersagen, doch bei einer großen Zahl gleichartiger Kerne verläuft der Prozeß nach einer statistischen Gesetzmäßigkeit: für jede Kernart (Nuklid) bleibt der Prozentsatz der in gleichlangen Intervallen „zerfallenden“ Kerne gleich, was man unter Verwendung des Begriffes *Halbwertszeit* ($T_{1/2}$) besonders anschaulich beschreiben kann (S. 5). Es gibt auch radioaktive Nuklide, bei denen sich der Übergang zu einem stabilen Kern über einen oder mehrere Zwischenkerne vollzieht, deren jeder eigene Strahlungseigenschaften und eine eigene $T_{1/2}$ hat.

Die Strahlungen durchdringen Materie sehr unterschiedlich gut (S. 4). Aus ihrer Fähigkeit, sie zu ionisieren, in geeignete Stoffen (Szintillatoren) Luminiszenz auszulösen und photographische Emulsionen zu schwärzen, ergeben sich Möglichkeiten, sie quantitativ oder bildhaft nachzuweisen.

Nuklide und Isotope

Die Masse jedes Atoms ist in seinem Kern konzentriert. Er besteht aus Protonen (Wasser-

stoffkernen ${}^1_1\text{p} = {}^1_1\text{H}$) und Neutronen (${}^1_0\text{n}$), die praktisch gleiche Massen haben ($1,67 \times 10^{-24}\text{g} = \text{Atommasse „1“} = 1/12$ des Kohlenstoffkernes ${}^{12}_6\text{C}$). Die Ordnungszahl Z eines Elementes im Periodischen System ist mit der Zahl der Protonen im Kern identisch. Unterschiede der Kernmasse M rühren von einer ungleichen Zahl der Kernneutronen N her; stets gilt: $M = Z + N$. Kerne desselben Elementes aber verschiedener Masse bzw. Neutronenzahl heißen *Isotope*, da sie „am gleichen Ort“ (des Periodischen Systems) stehen. Als *Nuklide* bezeichnet man die Gesamtheit der Isotope aller Elemente. Jedes Element bis zur Ordnungszahl 83 (Bi) hat ein oder mehrere stabile und außerdem noch eine Anzahl instabiler d. h. radioaktiver Isotope. *Reinelemente* (z. B. Be, F, Na) besitzen nur 1 stabiles, die anderen Elemente mehrere stabile Isotope, welche in einem konstanten Mischungsverhältnis vorliegen und zu den von der Ganzzahligkeit abweichenden Atommassen (Atomgewichten) führen.

Heute sind 105 chemische Elemente bekannt. Darauf verteilen sich 241 stabile und 1359 radioaktive, zusammen 1600 Nuklide. Eine praktische Übersicht vermittelt das Nuklid-Schema (Abb. 1), (Ordinate: Protonen- oder Ordnungszahl Z , Abszisse: Neutronenzahl N).

Isotope $Z = \text{const.}$	stehen hier in horizontaler Folge nebeneinander. Sie unterscheiden sich nur durch die Zahl der Kernneutronen.
Isotone $N = \text{const.}$	stehen vertikal übereinander. Sie enthalten jeweils gleich viele Kernneutronen, doch ungleich viel Kernprotonen.
Isobare $N + Z = \text{const.}$	Kerne gleicher Masse; hier durch Geraden verbunden, die 45 Grad nach links oben verlaufen (β^- - u. β^+ -Strahler).

Isodiaphere $N - Z = \text{const.}$	Kerne, bei denen die Differenz aus Neutronen- und Protonenzahl gleich bleibt; durch Geraden verbunden, die 45 Grad nach rechts oben verlaufen (α -Strahler).
Isomere $N = \text{const.}$ $Z = \text{const.}$	Kerne unveränderter Neutronen- und Protonenzahl, die sich durch den energetischen „Anregungszustand“ unterscheiden; Emission von γ -Quanten führt zum Grundzustand (in der Nuklid-tabelle auf geteilten Feldern erfaßbar).

Die Nuklide füllen ein zusammenhängendes Gebiet von Punkten, das mit der Winkelhalbierenden zwischen Z- und N-Achse ansteigt, sich aber zunehmend der letzteren zuneigt und verbreitert. Der zentrale Bereich der *stabilen* Nuklide (schwarze Punkte) wird von 2 Bereichen *radioaktiver* Nuklide eingerahmt. Oberhalb stehen Radionuklide mit Protonen-, unterhalb solche mit Neutronenüberschuß. Beide haben die Tendenz, sich in stabile Nuklide umzuwandeln. Das geschieht meist durch *Emission von Kernbestandteilen* (radioaktive Strahlung), gelegentlich durch *Aufnahme von Hüllenelektronen* in den Kern (S. 4). Der mit steigender Ordnungszahl zunehmende Neutronenüberschuß ist zur Aufrechterhaltung der Kernstabilität notwendig. Wird z.B. ein schwerer Kern gespalten, so entstehen Spaltprodukte, die einen hohen Neutronenüberschuß gegenüber ihren stabilen Isotopen haben. Er wird durch Emission von β -Teilchen ausgeglichen. Freigesetzte Neutronen können dann Anlaß zu neuen Kernspaltungen geben bzw. eine Kettenreaktion einleiten.

Arten der Kernstrahlung

Man unterscheidet *Korpuskularstrahlen* und *elektromagnetische Strahlen*. Zu den ersteren gehören:

- α -Strahlen
bestehend aus He^{++} -Ionen ($Z = 2, N = 2$)
- β -Strahlen
bestehend aus Elektronen (Negatronen)
- β^+ -Strahlen
bestehend aus Positronen,

zu den zweiten gehören:

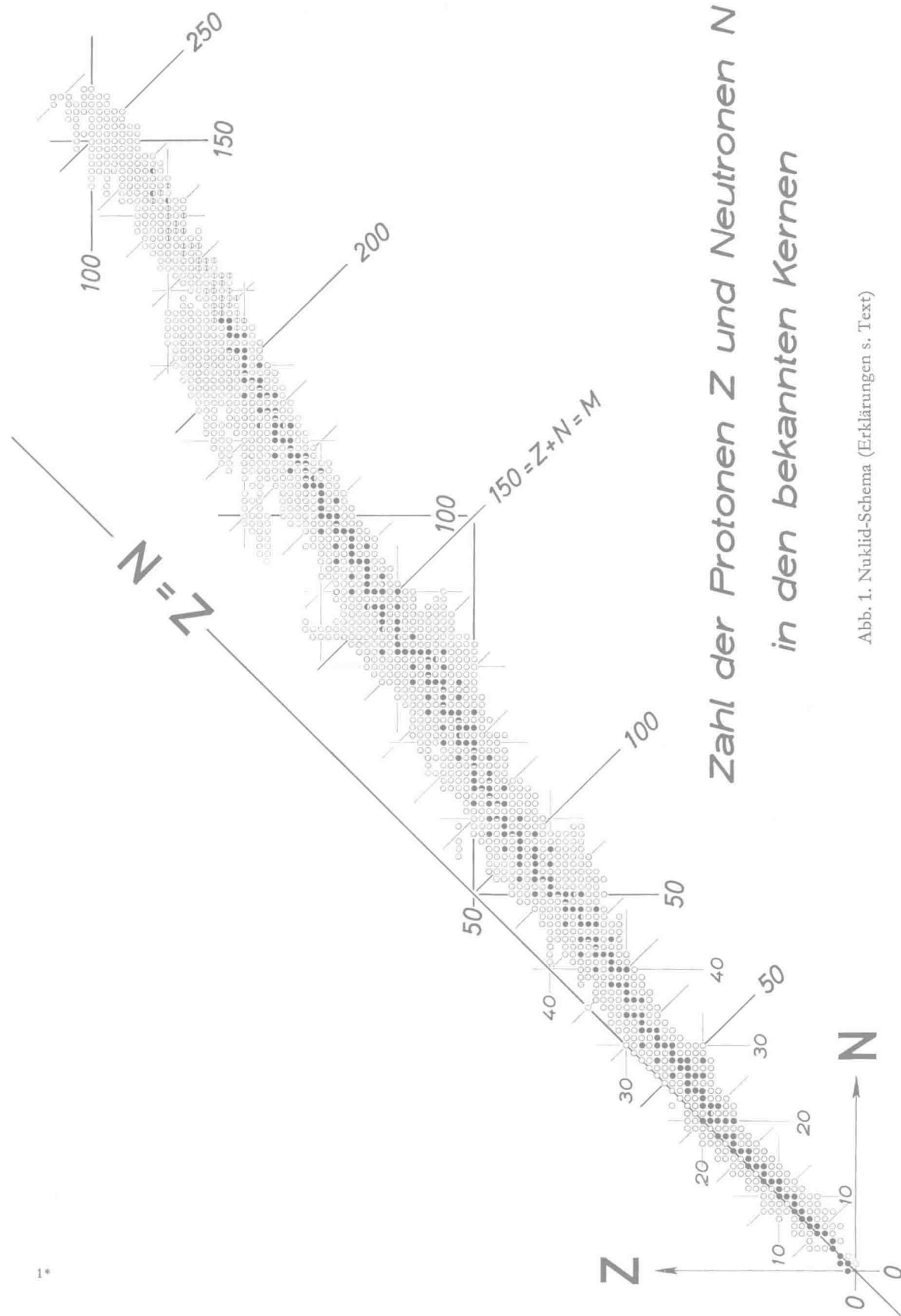
- γ -Strahlen
bestehend aus elektromagnetischen Quanten.

Korpuskularstrahlung wird durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt, durchdringt daher Materie weit schlechter als γ -Strahlung. Zur Kennzeichnung beider Strahlungsarten wurde ein *Energiemaß* eingeführt: bei Korpuskularstrahlung wird das Produkt aus der Ladung der Teilchen d. h. Zahl der Elementarladungen (e) und derjenigen Spannung (V) angegeben, die notwendig wäre, um sie bis zur Ruhe abzubremesen bzw. anfangs ruhende Teilchen auf eben diesen Energiezustand zu beschleunigen. So kommt die Einheit *Elektronen-Volt* (eV) zustande, die den Energieinhalt jedes Teilchens angibt. Vielfache hiervon heißen $\text{keV} = 10^3 eV$, $\text{MeV} = 10^6 eV$, $\text{GeV} = 10^9 eV$. Die Energie elektromagnetischer Strahlung kann ebenso ausgedrückt werden, da eine totale Energieumsetzung von einem Elektron in ein Quant und umgekehrt möglich ist (Röntgenstrahlung bzw. Photoeffekt).

Geladene Teilchen werden beim Eindringen in Materie durch die elektrischen Felder der Atome bis zur Ruhe bzw. Reaktion mit anderen Partikeln abgebremst. Man findet daher eine *maximale Reichweite*. Die Intensität elektromagnetischer Strahlung nimmt dagegen mit zunehmender Absorberdicke nach einer e -Funktion ab. Zur Kennzeichnung des Durchdringungsvermögens (Härte) kann man die *Halbwertsdicke* verwenden, d. h. diejenige Materialdicke, die die Strahlungsintensität auf die Hälfte ihres anfänglichen Wertes verringert. Die maximale Reichweite geladener Teilchen gibt man, um ein dichteunabhängiges Maß zu gewinnen, in Flächendichte [g/cm^2] an (Produkt aus Dichte [g/cm^3] und Schichtdicke [cm]). Selbst hier ist die Angabe einer Halbwertsdicke [g/cm^2] sinnvoll, da sie experimentell sicherer bestimmbar ist als die maximale Reichweite.

α -Strahlung, im wesentlichen auf Nuklide höchster Ordnungszahlen ($> 82 = \text{Pb}$) beschränkt, findet in der Funktionsdiagnostik praktisch keine Anwendung.

β -Strahlung weist, im Gegensatz zu α - und γ -Strahlung, ein kontinuierliches Energie-



Zahl der Protonen Z und Neutronen N
in den bekannten Kernen

Abb. 1. Nuklid-Schema (Erklärungen s. Text)

Tabelle 1. Energien, Reichweiten und Halbwertsdicken der Strahlungen radioaktiver Nuklide

	α -Strahlung	β -Strahlung	γ -Strahlung
Strahlungstyp	Korpuskel	Korpuskel	Wellen
Bestandteile	$^4_2\text{He}^{++}$ -Ionen	e^- Elektronen	el. magn. Quanten
Energiespektrum	Linien	kontinuierlich	Linien
Energiewerte [MeV]	4,3...9,0	0,018... R_{max} ...5,3	0,008...8,9
Max. Reichweite [mg/cm ²]	5...14	0,9...2700	entfällt
	Papier	3 μ ...1 cm Al	
Halbwertsdicke [mg/cm ²]		0,12...560	13,5...20000

spektrum auf. Die Maximalenergie entspricht der bei der Kernumwandlung stattfindenden Massenänderung. Zwischen ihr und der maximalen Reichweite besteht folgende Beziehung:

$$R_{\text{max}} = 0,11 \left(\sqrt{1 + 22,4 \cdot E_{\text{max}}^2} - 1 \right)$$

R_{max} [g/cm²] E_{max} [MeV]

β -Teilchen mit geringerer Energie als E_{max} sind weit häufiger. Man verwendet darum auch den Begriff „mittlere Energie“, die für alle β -Strahler bei etwa $\frac{1}{3} E_{\text{max}}$ liegt. Dieser Wert ist nur wenig höher als die Energie der Teilchen größter Häufigkeit.

Dem kontinuierlichen Energiespektrum eines β -Strahlers können auch Linien überlagert sein, die von Elektronen diskreter Energie stammen. Das ist möglich, wenn das Nuklid gleichzeitig γ -Strahlen aussendet und diese beim Durchdringen der Elektronenhülle – ähnlich dem photoelektrischen Effekt (S. 8) – ihre Energie an ein Hüllenelektron übertragen, das dann mit der Energie des γ -Quants, vermindert um die Bindungsenergie des Elektrons, das Atom verläßt. Man nennt dies *innere Konversion*. Der relative Anteil der Konversions-elektronen zu den nichtkonvertierten γ -Quanten ist in den Nuklidtabellen angegeben. Konversionselektronen sind von der Emission gleich vieler Quanten der charakteristischen *Röntgenstrahlung* begleitet, die beim Auffüllen der Lücken in den Elektronenschalen in gleicher Weise entsteht wie beim K-Einfang.

Eine Sonderstellung nimmt die Positronenstrahlung (β^+) ein. Die emittierten Partikel sind positive Elementarladungen ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Clb) und haben eine Ruhemasse wie die Elektronen ($9,1 \cdot 10^{-28}$ g). Was sie von diesen unterschei-

det, ist ihre überaus geringe mittlere Lebensdauer von etwa 10^{-10} sec. Daher werden Reichweiten und Halbwertsdicken nicht angegeben. Positronen treten im Zusammenhang mit der durch Kernprozesse ausgelösten künstlichen Radioaktivität (auch Höhenstrahlung) auf. Die Energien, mit denen Positronen den Kern verlassen, liegen zwischen 0,15 und 16,6 MeV. Das Positron reagiert mit dem Elektron in eigenartiger Weise: die gegensätzlichen Ladungen gleichen sich aus und die Massen wandeln sich in elektromagnetische Strahlung um. Diese tritt meist in Gestalt zweier γ -Quanten von je 0,51 MeV auf, die den Ort der „*Zerstrahlung*“ in entgegengesetzter Richtung verlassen, seltener als 1 einziges Quant von 1,02 MeV. Der umgekehrte Prozeß ist die „*Paarbildung*“, – die Umwandlung eines γ -Quantes von mindestens 1,02 MeV in ein Elektron und ein Positron. Beide Prozesse haben auch in der nuklearmedizinischen Praxis einige Bedeutung.

Positronenstrahler sind Nuklide, die zu viele Protonen haben, demnach im Nuklid-Schema (Abb. 1) oberhalb der „Stabilitätsrinne“ liegen. Der Ausgleich kann erfolgen, indem ein Positron aus dem Kern gestoßen wird, wobei sich die Ordnungszahl um 1 vermindert, die Masse dagegen nicht (isobarer Vorgang). So entsteht ein Isotop des Elementes mit nächstniedriger Ordnungszahl. Das Gleiche geschieht, wenn der Kern ein Elektron, meist aus der kernnächsten Elektronenschale (K) herausreißt und sich einverleibt (K-Einfang, englisch EC = electron capture). Die entstandene Lücke füllt sich mit einem Elektron der Umgebung auf (dabei Emission eines charakteristischen Röntgenquantes). Beides kann auch nebeneinander verlaufen (Beispiele: ^{52}Mn , ^{57}Ni).

γ -Strahlung tritt nur im Gefolge einer vorangegangenen Kernveränderung (meist Emission von Partikeln) auf, bei manchen Nukliden (reinen β -Strahlern) bleibt sie aus. Man kann sie als das Zurückfallen der Kernbausteine in eine energetisch niedrigere Anordnung auffassen (Übergang aus einem „angeregten“ in den „Grundzustand“). Dies kann in einem einzigen Schritt oder über Zwischenstufen erfolgen; oft bestehen auch mehrere solcher Möglichkeiten nebeneinander. Die meisten Nuklide strahlen γ -Quanten zusammen mit Partikeln ab, so daß

man beides zeitlich nicht trennen kann (Ko-inkidenz). Bei anderen wieder ist der angeregte Zustand länger lebensfähig. Man nennt dies „Kernisomerie“ und das angeregte Nuklid „metastabil“. Zur Kennzeichnung fügt man zur Massenzahl den Buchstaben m, z. B. ^{60m}Co . Die anschaulichste Darstellung der bei einem Nuklid auftretenden Kernstrahlungen bietet sein Zerfalls-Schema. Die international maßgebliche Zusammenstellung findet sich in der „Table of Isotopes“, (1967).

Gesetz des radioaktiven Zerfalls

So vielfältig die Erscheinungsformen der Kernumwandlungen sein mögen, sie folgen alle, was ihren quantitativen Verlauf betrifft, dem gleichen einfachen Gesetz. Es besagt, daß von jedem radioaktiven Nuklid in gleichen Zeitintervallen ein gleichbleibender Prozentsatz von Kernen zerfällt (Zerfallskonstante λ [%/min]).

In integrierter Form lautet das Zerfallsgesetz:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

N_0 und N_t Anzahl der radioaktiven Kerne zu 2 Zeitpunkten 0 und t.

Durch Multiplikation mit λ erhält man:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

A_0 und A_t Anzahl der Zerfälle pro Zeit (Aktivität) zur Zeit 0 und t.

Die Einheit für die Aktivität ist das „Curie“ (Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Zerfälle/sec} \\ = 2,22 \cdot 10^{12} \text{ Zerfälle/min}$$

dem- 1 mCi = $2,22 \cdot 10^9$ /min (Milli-Curie)
gemäß 1 μCi = $2,22 \cdot 10^6$ /min (Mikro-Curie)
1 nCi = $2,22 \cdot 10^3$ /min (Nano-Curie)
1 pCi = 2,22/min (Pico-Curie)

Durch Einführung der Halbwertszeit $T^{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ erhält man eine dem Praktiker angenehmere Form der Gleichung:

$$A_t = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T^{1/2}}}$$

Somit beträgt die Aktivität nach $t = 1 T^{1/2}$ noch $1/2$, nach $2 T^{1/2}$ noch $1/4$, nach $3 T^{1/2}$ noch $1/8$ usf.

– z. B. nach $10 T^{1/2}$ noch $1/1024$, also rund 1 Promille ihres anfänglichen Wertes.

Besonders die Verwendung kurzlebiger Nuklide zwingt zur Berichtigung aller Meßergebnisse auf einen festen, wenn auch beliebigen Zeitpunkt. 3 empfehlenswerte Methoden sind im Anhang (Tabelle 2) angegeben.

Der Aktivitätsverlauf von Nuklidgemischen, insbesondere von Mutter-Tochter-Systemen, folgt komplizierteren Gesetzmäßigkeiten, die von BATMAN (1910) abgeleitet wurden und z. B. bei SCHINDEWOLF (1959) anschaulich dargestellt sind. Wegen ihrer praktischen Bedeutung im medizinischen Bereich („Melk-Systeme“) seien einige Mutter-Tochter-Nuklide aufgeführt:

^{113}Sn 118d	^{99}Mo 67 h	^{140}Ba 12,8 d
K	β	$\beta + \gamma$
^{113m}In 1,7h	^{99m}Tc 6 h	^{140}La 40,2 h
γ	γ	$\beta + \gamma$
^{113}In stabil	^{99}Tc $2 \cdot 10^5 \text{ a}$	^{140}Ce stabil

In diesen Fällen ist das Mutternuklid längerlebig als das Tochternuklid. Auch das Umgekehrte kommt vor, hat aber hier keine praktische Bedeutung. Der Aktivitätsverlauf des 3. Beispiels ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Aktivität des ^{140}Ba verläuft in halblogarithmischen Koordinaten als fallende Gerade (3), die bei 100% beginnt. Die des ^{140}La (2) steigt von dem (nicht darstellbaren) Wert 0 steil an, schneidet die Kurve der Mutter nach

mehreren Halbwertszeiten und erhebt sich so- dann darüber, um schließlich in einen dazu parallelen Verlauf einzumünden. Danach fällt die Summenkurve (1) wie die des längerlebigen Mutter-Nuklids. Im *radioaktiven Gleichgewicht* (Schnittpunkt) zerfallen ebensoviele Tochterkerne, wie nachgebildet werden. Hier liegt zugleich das Maximum der Tochterkurve. Bei ge- nügend langlebigem Mutternuklid ($T_{1/2M} : T_{1/2T} > 100$) darf man sagen, daß Mutter und Tochter von da an etwa gleich hohe Aktivität haben, die Summenaktivität also das Doppelte der einen von beiden beträgt.

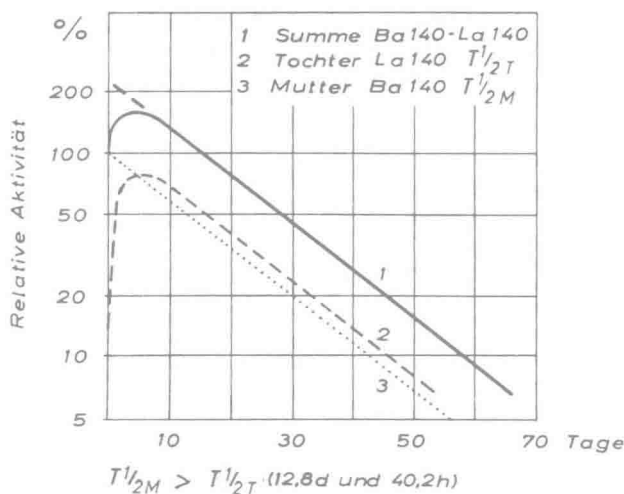


Abb. 2. Verlauf der Aktivitäten eines Mutter-Tochter-Nuklides (nach OVERMAN u. CLARK, 1960)

Strahlung und Materie

Jede Strahlung wird beim Durchgang durch Materie geschwächt. Während *Korpuskeln* ihre anfängliche Energie vorwiegend durch Zusammenstöße mit Atomen des Absorbers einbüßen, bis ihr Energievorrat aufgezehrt ist, werden die Quanten der γ -Strahlung vor allem aus ihrer anfänglichen Richtung gestreut, auch durch Energieumwandlung (Ionisation, Anregung, Licht, Molekülsplaltung, Wärme) geschwächt. Hieraus ergibt sich ein praktisch bedeutsamer Unterschied. *Korpuskeln* werden in Materie *völlig absorbiert*, so daß man ihre *maximale Reichweite* angeben kann. Deren Kenntnis ist für den praktischen Strahlenschutz von Wichtigkeit. Zum anderen stellt diese Größe ein ausgezeichnetes, weil leicht nachprüfbares

Auch der andere Fall ist denkbar: ein kürzerlebigeres Mutternuklid bringt ein längerlebigeres Tochternuklid hervor. Hier fällt die Zerfallskurve der Mutter zunächst steil ab, bis das längerlebige Tochternuklid in Erscheinung tritt, die Mutterkurve schneidet und dann gemäß der ihm eigenen, längeren Halbwertszeit abfällt, so daß schließlich das Tochternuklid allein übrigbleibt.

In beiden Fällen setzt sich nach einigen Halbwertszeiten der kürzerlebigen Komponente ein Verlauf der *Summenkurve* durch, der dem des jeweils *längerlebigen* Nuklides entspricht.

Charakteristikum für Art und Energie (Härte) der Strahlung dar. Für *Röntgen- und γ -Strahlung* existiert *keine maximale Reichweite*, da der Quantenstrom in Materie eine Schwächung erfährt, die dem LAMBERT-BEER-Gesetz, einer Exponentialfunktion, folgt (S. 8). Somit kann diese Strahlung zwar beliebig geschwächt, doch nie auf den Wert 0 gebracht werden. Als praktisches Maß für ihre Durchdringungsfähigkeit wurde die *Halbwertsdicke* (auch Halbwertschicht genannt) eingeführt. Das ist diejenige Materialschicht, die eine Strahlung gerade auf die Hälfte ihrer anfänglichen Intensität schwächt. Zu ihrer Kennzeichnung sind Art und Dicke des Absorbers anzugeben. Vielfach wird hierfür auch die Flächendichte FD verwendet, die

von Materialkonstanten unabhängig ist und das Produkt aus Materialdichte [g/cm^3] und Schichtdicke [cm] darstellt. So entspricht etwa 1 mm Al einer FD von $2,7 \text{ g/cm}^3 \times 0,1 \text{ cm} = 0,27 \text{ g/cm}^2$.

α -, β - und γ -Strahlen werden in Materie sehr verschieden stark absorbiert. Für die bei radioaktiven Nukliden vorkommenden Energiebereiche sind in Tabelle 1, S. 4. Werte für maximale Reichweiten bzw. Halbwertsdicken zusammengestellt.

Vielfach wird übersehen, daß auch β -Strahlung elektromagnetische Strahlung auslöst, wenn sie auf Material hoher Ordnungszahl trifft, z.B. Metalle. Die hierbei entstehenden Röntgenstrahlen bestehen aus 2 Anteilen: einer *charakteristischen Strahlung* und einer *Bremsstrahlung*. Die charakteristische Strahlung ist monochromatisch (MOSELEY-Gesetz). Die Bremsstrahlung entsteht aus der beim Aufprall eintretenden Verzögerung der Elektronen, deren Energieverteilung allein von der Elektronenenergie, nicht aber vom Material abhängig ist (DUANE-HUNT-Gesetz).

Weitere Anteile eines γ -Untergrundes haben ihre Ursache in der durchdringenden *Höhenstrahlung*, die durch eine von der Sonne ausgehende Protonenstrahlung in der Atmosphäre ausgelöst wird, sowie in der *Umgebungsstrahlung*. Unter diesem Begriff faßt man alle Strahlungen zusammen, die von natürlich und künstlich radioaktiven Bestandteilen in Boden, Luft, Baustoffen, selbst dem Abschirmungsmaterial sowie von benachbarten Quellen ausgehen. Die Ausschaltung solcher Störquellen ist in der nuklearmedizinischen Diagnostik um so mehr von Bedeutung, als man mit geringstmöglichen Aktivitäten auszukommen sucht (Herabsetzung der Strahlenbelastung).

Da alle Korpuskularstrahlen ein sehr geringes Durchdringungsvermögen in Materie haben, eignen sich β -Strahler nicht zur Verfolgung inkorporierter Aktivität von der Körperoberfläche her, wohl aber zur Messung an entnommenen Proben von Geweben, Körperflüssigkeiten und -ausscheidungen. α -Strahlen haben zu geringe Reichweiten. β -Strahlen vergleichbarer Energie dringen, wie Tab. 1, S. 4 zeigt, nur wenig tiefer in Materie ein (in mensch-

lichem Gewebe und Wasser 9μ bis $2,7 \text{ cm}$). Für Elektronen aus Teilchenbeschleunigern liegen die Werte etwas höher (vgl. Tab. 2).

Bei Aktivitätsmessungen an nicht „unendlich dünnen“ Präparaten zwingt die hohe Absorbierbarkeit aller Korpuskularstrahlen dazu, die „Selbstabsorption“ zu berücksichtigen und alle Meßwerte entsprechend zu korrigieren. Näheres entnehme man den Lehrbüchern, etwa FAIRES – PARKS (1961).

Bei der Verwendung der γ -Komponente von $\beta + \gamma$ -Strahlern, zu denen die meisten in der Medizin benutzten Radionuklide gehören, ist es andererseits leicht, die unerwünschte Korpuskularkomponente durch Vorschalten von Materialfolien von der Flächendichte der maximalen Reichweite auszufiltern. Tabelle 2 enthält die maximalen Reichweiten für 5 über den gesamten Energiebereich verteilte β -Strahler, zugleich in Schichtdicken für Wasser bzw. Gewebe.

Tabelle 2. Eindringtiefen von Elektronen und β -Teilchen in Wasser bzw. Gewebe

Nuklid	$E\beta_{\text{max}}/E_e$ [MeV]	maximale Eindring- tiefe [mm]	Halb- werts- dicke [mm]
^3H	0,0186	0,009	0,0012
^{14}C	0,158	0,31	0,028
^{90}Sr	0,54	1,6	0,18
^{32}P	1,71	8,1	1,00
^{90}Y	2,27	11,1	1,55
aus Teilchen-	5	24	
beschleu-	10	47	
niger	15	71	
(Energie E_e)	30	143	
	50	240	

Wegen der geringen Masse der β -Teilchen ($m_\beta : m_x = \text{rund } 1 : 7500$) sind deren Bahnen in Materie vielfach geknickt, ihre *Streuung* also groß. Bei völliger Richtungsumkehr spricht man von *Rückstreuung*. Das Rückstreuvermögen einer Materialschicht ist von ihrer Dicke, von der Ordnungszahl der beteiligten Elemente und der β -Energie abhängig. Darauf basieren technische Dickenmeßverfahren. Doch auch für die Messung biologischer Präparate ergibt sich