

ISOTOPEN- UND STRAHLENFIBEL FÜR DEN ARZT

**ISOTOPEN-
UND STRAHLENFIBEL
FÜR DEN ARZT**

VON

PROF. DR. WALTER BEIER

UND

DR. MED. ERICH DÖRNER

MIT 175 ABBILDUNGEN UND 46 TABELLEN

DRITTE, ERWEITERTE AUFLAGE



VEB GEORG THIEME · LEIPZIG · 1960

ES 17 E

Alle Rechte vorbehalten · Printed in Germany

Copyright 1960 by VEB Georg Thieme, Verlag für Medizin und Naturwissenschaften, Leipzig

Veröffentlicht unter der Lizenz-Nr. 211/Gen.-Nr. 490/50/60

des Ministeriums für Kultur der Deutschen Demokratischen Republik

Satz und Druck: Buchdruckerei Richard Hahn (H. Otto), Leipzig O 5 (III/18/12)

DER PRAKTISCHEN ÄRZTIN
DR. MED. IRMGARD DÖRNER
GEWIDMET

Vorwort zur 3. Auflage

Die rasche Entwicklung der Isotopenanwendungen und die Ausnutzung der Kernenergie für technische Zwecke hat zwei Probleme besonders in den Vordergrund treten lassen: die Strahlenschäden und den Strahlenschutz. An dieser Tatsache konnten wir bei der Überarbeitung des Manuskriptes für die dritte Auflage nicht vorübergehen. Deshalb findet der Leser einige Einzelheiten des Strahlenschutzes und besonders auch die Möglichkeiten einer Therapie der Strahlenschäden etwas ausführlicher dargestellt, ohne freilich dabei eine Vollständigkeit anstreben zu wollen.

Leipzig, im April 1960

Die Verfasser

Vorwort zur 2. Auflage

Die Tatsache, daß sich bereits wenige Monate nach dem Erscheinen der Isotopen-Fibel eine Neuauflage erforderlich macht, scheint auf das Bedürfnis hinzuweisen, welches in den Kreisen der Ärzteschaft nach einem kleinen kurzgefaßten Buch über die Anwendungsmöglichkeiten radioaktiver Isotope in der Medizin zu bestehen scheint. Möge deshalb auch die vorliegende zweite Auflage dazu beitragen, dem Arzt das Verstehen der physikalischen Grundlagen der Kernmedizin zu erleichtern und ihn darüber hinaus die Vorteile der Verwendung radioaktiver Isotope in Diagnostik und Therapie, aber auch die Gefahren einer Strahlenschädigung erkennen zu lassen.

Leipzig, im September 1957

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort zur 3. und 2. Auflage	7
I. Einleitung	13
II. Grundlagen der Strahlungsphysik	14
1. Wellenstrahlungen	14
2. Korpuskularstrahlungen	16
3. Die Strahlungsintensität	17
III. Radioaktive Isotope als medizinische Strahlungsquellen . .	18
Physikalische Grundlagen	18
a) Vorbemerkungen	18
b) Atom- und Kernaufbau	19
c) Isotopie	25
d) Die Herstellung radioaktiver Isotope	26
Der (n, γ) -Prozeß	27
Der (n, p) -Prozeß	27
e) Der Kernreaktor	28
f) Teilchenbeschleuniger	31
g) Der radioaktive Zerfall	34
IV. Der Strahlungsnachweis	37
1. Vorbemerkungen	37
2. Die Photoemulsion	37
3. Das Zählrohr	40
4. Szintillationszähler	41
V. Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie	42
1. Vorbemerkungen	42
2. Physikalische Strahlenwirkungen	43
a) Der Photoeffekt	43
b) Der Comptoneffekt	43
c) Die Paarbildung	43
3. Chemische Strahlenwirkungen	45
4. Die Treffertheorie der biologischen Strahlenwirkungen . .	46
5. Die biologischen Strahlenwirkungen an der Zelle	47
6. Strahlenwirkungen auf die Keimzellen	52

	Seite
VI. Die Dosierung der Radioisotope	54
1. Vorbemerkungen	54
2. Die Dosiseinheiten	54
3. Die Aktivität	59
VII. Die derzeitige Strahlenbelastung des Menschen	63
1. Die natürliche Strahlenbelastung	63
2. Die kosmische Höhenstrahlung	64
3. Die Strahlung aus Luft und Boden (Umgebungsstrahlung)	65
4. Die Strahlenbelastung durch die im menschlichen Körper	
vorhandenen natürlichen radioaktiven Substanzen	66
5. Die Strahlenbelastung durch mit der Nahrung aufgenom-	
mene natürliche Isotope	66
6. Die Strahlenbelastung des Menschen durch Zivilisations-	
einrichtungen	67
7. Die Strahlenbelastung der Gesamtbevölkerung durch	
medizinische Maßnahmen	69
8. Berufliche Strahlenbelastung	70
9. Strahlenbelastung in utero	71
VIII. Die Strahlengefährdung des Menschen durch Anwendung	
nuklearer Energien	72
1. Gefahrenquellen bei der Anwendung der künstlichen radio-	
aktiven Isotope	73
2. Gefahrenquellen beim Betrieb von Kernreaktoren und	
anderen Höchstleistungsanlagen	73
Die Strahlengefährdung beim Reaktordurchgang	75
3. Die Strahlengefährdung des Menschen durch die radio-	
aktive Verseuchung bei der Erprobung von Kernwaffen	76
IX. Die wichtigsten Strahlenschäden	83
1. Vorbemerkungen	83
2. Strahlenschäden bei der Aufnahme radioaktiver Sub-	
stanzen in den Körper	86
3. Die akute Strahlenkrankheit	88
4. Schäden und Nebenwirkungen wiederholter kurzfristiger	
oder chronischer niedrigdosierter Ganz- und Teilbestrah-	
lungen mit ionisierenden Strahlen	93
5. Möglichkeiten der Behandlung von Strahlenschäden	98
a) Chemischer Strahlenschutz	98
b) Behandlungsmöglichkeiten nach Inkorporierung radio-	
aktiver Substanzen	99
Dekorporierung inkorporierter Isotope	101
c) Die Behandlung des akuten Strahlensyndroms	101
Die Allgemeinbehandlung	102

Behandlung von Veränderungen des Blutes und der Blutbildungsorgane	102
Knochenmarktransplantation	102
Behandlung der Störungen im Magen-Darmkanal	103
Die Behandlung der vermehrten Infektionsbereitschaft	103
Behandlung lokaler Strahlenschäden	103
X. Strahlenschutz	104
1. Toleranzdosis und Toleranzkonzentration	104
2. Der Umgang mit radioaktiven Isotopen	109
3. Ausstattung der Isotopenräume	115
4. Beseitigung von radioaktiven Abfällen des Isotopenlabors	126
XI. Die Anwendungsmöglichkeiten der radioaktiven Isotope in Biologie und Medizin	129
1. Vorbemerkungen	129
2. Die Messung der Aktivität radioaktiver Substanzen im menschlichen Organismus	129
3. Die radioaktiven Isotope als Indikatoren	140
4. Die radioaktiven Isotope in der klinischen Forschung und Diagnostik	143
5. Kreislaufstudien zur Bestimmung der Kreislaufgrößen	144
6. Stoffwechselstudien mittels radioaktiver Isotope	145
7. Radioaktive Isotope zur Diagnose der Geschwulstkrankheiten	145
8. Die Anwendung der radioaktiven Isotope in der Therapie	146
a) Die interne Behandlung	146
b) Die radioaktiven Isotope in der Tumorthherapie	147
Die Selektivtherapie durch Speicherung der radioaktiven Isotope im Tumorgewebe über den Stoffwechsel.	147
Die Oberflächenbestrahlung	147
Die intrakavitäre Bestrahlung	150
Die interstitielle Bestrahlung	154
Die Fernbestrahlung	157
XII. Die wichtigsten radioaktiven Isotope für Biologie und Medizin	159
Vormerkungen	159
1. Das Isotop Kohlenstoff 14	160
2. Das Isotop Fluor 18	163
3. Das Isotop Natrium 24	163
4. Das Isotop Phosphor 32	167
a) Die Polycythaemia vera	176
b) Chronisch myeloische Leukämie	177
c) Chronisch lymphatische Leukämie	177

	Seite
5. Das Isotop Schwefel 35	179
6. Das Isotop Kalium 42	181
7. Das Isotop Kalzium 45	182
8. Das Isotop Chrom 51	183
9. Das Isotop Eisen 59	185
10. Das Isotop Kobalt 60	189
11. Die Isotope Kupfer 64 und Kupfer 67	201
12. Das Isotop Zink 65	202
13. Das Isotop Gallium 72	203
14. Das Isotop Arsen 76	204
15. Das Isotop Mangan 56	205
16. Das Isotop Krypton 85	205
17. Das Isotop Strontium 89	206
18. Das Isotop Strontium 90	207
19. Das Isotop Molybdän 99	210
20. Das Isotop Jod 131	211
21. Das Isotop Xenon 133	224
22. Das Isotop Cäsium 137	226
23. Das Isotop Gold 198	227
24. Relative Radiotoxizität (nach E. H. GRAUL)	234
XIII. Kleines ABC der Nuklearmedizin	237
XIV. Schrifttum	250
Sachverzeichnis	261

I. Einleitung

Mehr und mehr sind Erkenntnisse und Forschungsmethoden der Naturwissenschaften, insbesondere auch der Physik, von der medizinischen Wissenschaft übernommen worden. In der täglichen Arbeit des praktischen Arztes und des Biologen ebenso wie in der des medizinisch-technischen Hilfspersonals tauchen physikalische Arbeitsweisen und Methoden auf. Als Beispiele erinnern wir an die Hochfrequenzdiathermie zur dielektrischen Erwärmung von Körperteilen und Organen, an die Registrierung der Herzaktionsspannungen im Elektrokardiogramm zur Beurteilung der Funktionstüchtigkeit des menschlichen Herzens, an die mikroskopischen Arbeitsverfahren, an die Elektrophorese und nicht zuletzt an die Röntgentherapie und -diagnostik. Gerade die Verwendung physikalischer Strahlungsarten hat in den letzten Jahren eine starke Verbreitung in der Medizin und in der Biologie erfahren. Verbesserte Röntgenapparate und moderne Teilchenbeschleuniger haben wesentlich zu dieser Entwicklung beigetragen; den größten Einfluß haben aber wohl die durch die großen Erfolge der Kernphysik in den letzten 10 Jahren künstlich hergestellten Radioisotope ausgeübt. Sie stellen Strahlungsquellen kleinsten Ausmaßes mit hoher Strahlenenergie dar, die dem Arzt neue, weite Anwendungsgebiete physikalischer Strahlungen ermöglichen. Jedoch ist die Originalliteratur über die medizinischen Anwendungen der radioaktiven Isotope in so starkem Maße angewachsen, daß dem praktischen Arzt aus Zeitmangel kaum die Möglichkeit bleibt, das Studium der Originalarbeiten zu betreiben. Deshalb hat sich das vorliegende kleine Werk die Aufgabe gestellt, besonders dem in der Praxis stehenden Arzt die Grundlagen der Anwendung radioaktiver Isotope in der Medizin an Hand einiger ausgewählter Beispiele, Tabellen und Abbildungen näher zu bringen.

II. Grundlagen der Strahlungsphysik

1. Wellenstrahlungen

Wir unterscheiden mechanische und elektromagnetische Wellen. Zu den ersten gehören Wasserwellen, Seilwellen und Schallwellen, zu den zweiten die Radiowellen, die Infrarotstrahlen, das sichtbare Licht, das ultraviolette Licht, die Röntgenstrahlen und die γ -Strahlen. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die elektromagnetischen Wellen.

Tabelle 1
Die elektromagnetischen Wellen

Strahlenart	Mittlere Wellenlänge (Meter)	Frequenz (Sekunde ⁻¹)
Lange Welle	10^3	$3 \cdot 10^5$
Mittelwelle	$3 \cdot 10^2$	10^6
Kurzwellen	$3 \cdot 10^1$	10^7
Ultrakurzwellen	3	10^8
Dezimeterwellen	$3 \cdot 10^{-1}$	10^9
Mikrowelle	10^{-2}	$3 \cdot 10^{10}$
Infrarot	10^{-5}	$3 \cdot 10^{13}$
Sichtbares Licht	$5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$
Ultraviolett	10^{-7}	$3 \cdot 10^{15}$
Röntgenstrahlen	10^{-10}	$3 \cdot 10^{18}$
Vernichtungsstrahlen	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$1,24 \cdot 10^{20}$
γ -Strahlen	10^{-12}	$3 \cdot 10^{20}$
Kurzwellige γ -Strahlen	10^{-13}	$3 \cdot 10^{21}$
Photonen der kosmischen Strahlung	10^{-15}	$3 \cdot 10^{23}$

Jede elektromagnetische Strahlung stellt einen Energietransport dar, wobei die Energieübertragung auch im Vakuum erfolgt. Elektromagnetische Wellen entstehen durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder. Wird ein elektromagnetisches Feld in einem begrenzten Raumteil erzeugt, so breitet es sich im übrigen Teil des Raumes mit einer hohen Geschwindigkeit aus. Sie beträgt im Vakuum für alle elektromagnetischen Strahlungen etwa 300 000 km je Sekunde.

Bei periodischer Erzeugung eines elektromagnetischen Feldes entstehen elektromagnetische Wellen. Sie bestehen aus einer Folge gleicher Raumzustände, deren gegenseitiger Abstand die Wellenlänge der Strahlung heißt. Abbildung 1 zeigt schematisch das Bild eines Wellenzuges. Man hat sich vorzustellen, daß die Kurve (Sinuskurve) die Stärke des elektrischen Feldes in einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt. Wir kennen elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von 10000 m bis herab zu 10^{-15} m (0,000000000000001 m). Wie aus der Tabelle 1 hervorgeht, machen die längsten Wellen das Gebiet der drahtlosen Telegraphie aus. Im Größenbereich von 1000 m bis 100 m liegt das Rundfunk-Langwellengebiet. Anschließend finden wir das Gebiet der Mittelwellen und weiter das der Kurz- und Ultrakurzwellen. Das fol-

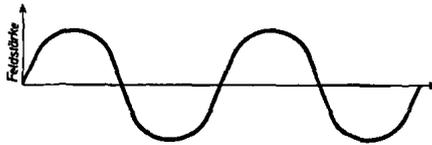


Abb. 1. Elektromagnetische Welle, schematisch

gende Gebiet der Mikrowellen besitzt für den Arzt praktische Bedeutung. Man kennt heute neben der klassischen Diathermie, der Kondensatorfeldbehandlung und der Spulenfeldbehandlung mit Hochfrequenzströmen bereits eine Mikrowellentherapie. Bei ihr erfolgt eine günstige Erwärmung der hinter dem Unterhautfettgewebe befindlichen Muskelgewebe durch eine kurzwellige elektromagnetische Strahlung.

Diese Mikrowellen stellen den Anschluß an das für Bestrahlungszwecke wichtige Infrarotgebiet her, das seinerseits kontinuierlich in den Bereich des sichtbaren Lichtes mit einer mittleren Wellenlänge von 0,0006 mm übergeht.

Nach den kürzeren Wellenlängen folgen dann der Ultraviolettbereich, das Gebiet des Röntgenlichtes und die äußerst kurzwellige γ -Strahlung. Ultraviolette Strahlung, Röntgenstrahlung und γ -Strahlung finden in der Medizin vielseitige Anwendung.

Nach unseren heutigen Auffassungen über elektromagnetische Strahlungen weisen diese eine Doppelnatur auf. Unter bestimmten

Versuchsbedingungen treten ihre Welleneigenschaften zurück. Die Welle verhält sich dann so, als ob sie aus einem Schwarm einzelner Strahlungsteilchen, genannt Photonen, bestehen würde.

2. Korpuskularstrahlungen

Neben der elektromagnetischen Wellenstrahlung finden in der Therapie und Diagnostik Korpuskularstrahlen Anwendung. Korpuskularstrahlen stellen rasch bewegte elektrisch geladene oder auch neutrale Teilchen dar. Man verwendet dazu die Elementarbausteine der Materie.

Es gibt deshalb:

1. β^- -Strahlen: Sie bestehen aus Elektronen.
Ihre Masse ist im Ruhezustand außerordentlich klein (10^{-31} kg). Elektronen tragen eine negative elektrische Elementarladung. Man nennt sie deshalb auch Negatronen.
2. β^+ -Strahlen: Sie bestehen aus Positronen.
Diese stellen das Gegenstück zu den Elektronen dar. Bei gleicher Ruhmasse tragen sie eine positive elektrische Elementarladung.
3. Protonen-Strahlen: Sie bestehen aus Atomkernen des Wasserstoffes. Ihre Masse beträgt annähernd das 1840fache der Elektronenmasse. Protonen besitzen eine positive elektrische Elementarladung.
4. Neutronen-Strahlen: Sie bestehen aus elektrisch ungeladenen Teilchen mit annähernd der gleichen Masse wie das Proton. Neutronen und Protonen stellen die Bausteine der Atomkerne dar.
5. α -Strahlen: Sie bestehen aus Atomkernen des Heliums, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen aufgebaut sind. α -Teilchen besitzen somit zwei positive elektrische Elementarladungen.

Rasch bewegte Partikelchen verhalten sich oftmals wie eine Wellenstrahlung. Man kann mit ihnen Interferenz- und Beugungserscheinungen — zwei charakteristische Welleneigenschaften — hervorbringen.