

STRAHLUNG UND WETTER

BEARBEITET VON

H. FRITZ-NIGGLI · G. MIESCHER · B. DE RUDDER
F. SCHWARZ · H. U. ZOLLINGER

REDIGIERT VON

F. ROULET

MIT 283 ABBILDUNGEN



SPRINGER-VERLAG
BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

1960

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses
Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie)
zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag OHG · Berlin · Göttingen · Heidelberg 1960

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in
diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme,
daß solche Namen im Sinn der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung
als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Allgemeine Strahlenbiologie. Von Professor Dr. HEDI FRITZ-NIGGLI-Zürich. Mit 56 Abbildungen	1
Einleitung	1
A. Das Wesen der energiereichen Strahlung	2
1. Corpuscularstrahlung	2
2. Elektromagnetische Wellenstrahlung	4
3. Verhalten der energiereichen ionisierenden Strahlung in der Materie	6
a) Anregung	7
b) Photoelektrischer Effekt	7
c) Compton-Effekt	8
d) Paarerzeugung	9
e) Primär-Sekundärelektronen und ionisierende Partikel	11
f) Reichweite und Transitionskurven	12
4. Radioaktivität	13
a) Natürliche Radioaktivität	13
b) Künstliche Radioaktivität	13
c) Konstanten der Radioaktivität	14
5. Dosis-Einheiten	15
B. Ionisierende Strahlung und Zelle	17
1. Morphologische Änderungen der ruhenden Zelle nach Bestrahlung	17
2. Physikalisch-chemische Änderungen des bestrahlten Cytoplasmas	19
3. Wechselwirkung Kern-Cytoplasma	21
4. Beeinflussung der Zellteilung	21
a) Temporäre physiologische Strahlenwirkung auf Mitose und Mitosebereitschaft	22
Mitoseminimum S. 23. — Dauer der mitosefreien Zeit S. 24. — Mitoseablauf S. 24. — Sensible Stadien S. 25. — Diffuse Chromosomenstörungen: Verklebungen und Pyknosen S. 25. — Beeinflussung der strahleninduzierten temporären Mitosestörung durch verschiedene Faktoren S. 27.	
b) Irreversible lokale Strahlenschädigung der Chromosomen	28
Einteilung der Chromosomenaberrationen S. 29.	
α) Chromosomenbrüche	29
Folgen eines einzigen Chromosomenbruchs	30
Folgen zweier Chromosomenbrüche	30
β) Chromatidenbrüche	31
Symbole	32
Physikalische Faktoren	35
Abhängigkeit der strahleninduzierten Chromosomenaberrationen von Applikation und Strahlenqualität	38
Strahlenqualität	38
5. Ionisierende Strahlung und Meiose	39
a) Physiologische Effekte	39
b) Crossing over-Anomalien	39
c) Chromosomenaberrationen	41
6. Genetische Schädigung	42
a) Systematik der genetischen Änderungen	42
b) Methoden zur Entdeckung von Mutationen bei Tieren	43
c) Einige Tatsachen der Strahlen-genetik	48
d) Somatische Mutationen	51

	Seite
e) Abhängigkeit der Mutationsentstehung vom Alter der Keimzelle während der Bestrahlung	51
f) Wirkung von Fraktionierung und Verdünnung der Strahlendosis auf die Zahl der Mutationen	55
g) Abhängigkeit der Mutationsrate von der Strahlenqualität	56
h) Mutationsrate und Milieufaktoren	57
Physikalische Milieufaktoren	60
i) Strahleninduzierte Mutationsraten und Verdoppelungsdosen	60
Natürliche Mutationsrate	61
Strahleninduzierte Mutationsrate	63
Festgestellte strahleninduzierte genetische Änderungen beim Menschen	64
Verdoppelungsdosen	64
7. Strahleninduzierte Gynander bei Drosophila	65
C. Ionisierende Strahlen und Entwicklung.	66
1. Embryonal- und Fetalentwicklung	66
a) Embryonale Strahlenschäden bei Wirbellosen	67
Schädigungen der Embryonen	68
Analyse der Schädigung.	68
Schädigung der Puppe	70
b) Strahlenschäden der Embryonen und Feten von Wirbeltieren	72
Amphibien	72
Die Strahlenempfindlichkeit verschiedener Entwicklungsstadien	72
Mißbildungen	75
Strahlenchimären und Parabiose	75
Schädigungen des Säugetier-Embryos und Fetus	76
Präimplantationsperiode	77
Organogenese und Gastrulation	77
Fetale Periode	79
Schädigung des menschlichen Embryos und Fetus	79
2. Phänokopien	80
3. Regeneration und Bestrahlung	82
D. Cancerogene Wirkung ionisierender Strahlen	83
1. Externe Bestrahlung	83
a) Lokale Schädigung	83
b) Totalbestrahlung	83
c) Leukämie	87
Mensch S. 89.	
2. Cancerogene Wirkung interner Bestrahlung mit radioaktiven Elementen	91
E. Strahlensyndrom	92
1. Strahlentod der Säugetiere	94
2. Strahlensyndrom des Menschen	95
3. Biologischer Strahlenschutz und Therapie	97
a) Parabiose	97
b) Organe, Gewebe und Gewebekomponenten	97
4. Schutz durch chemische Substanzen.	99
F. Biochemische Strahlenwirkungen	99
1. Verdünnungseffekt	100
2. Schutzeffekt	100
3. Strahlenwirkung auf einige Atmungsfermente.	101
G. Strahlenbiologische Theorien	102
1. Direkte Strahlenwirkung	102
2. Indirekte Theorie	104
Einfluß der Ionisationsdichte.	106
3. Diffusionstheorie	106
Literatur	107

Radio-Histologie und Radio-Histopathologie. Von Professor Dr. HANS U. ZOLLINGER-St. Gallen. Mit 178 Abbildungen	127
I. Ionisierende Strahlen und Gewebe	127
A. Konditionelle Faktoren	127
1. Die Bedeutung der Bestrahlungsform	127
2. Beziehungen zwischen der Stoffwechsellage und der Strahlenreaktion der Gewebe	130
3. Zusammenhang zwischen Wassergehalt der Gewebe und Strahlenempfindlichkeit	131
4. Der Differenzierungsgrad und die Proliferationstendenz der Gewebe in Beziehung zur quantitativen Strahlenreaktion	131
5. Speciesbedingte und individuelle Unterschiede bezüglich der Strahlensensibilität	132
B. Radio-Histopathologie	133
1. Bindegewebe	133
2. Fettgewebe	136
3. Reticulo-histiocytäres System	137
4. Gewebsmastzellen	137
5. Muskulatur	139
6. Knorpel und Knochen	141
7. Seröse Häute	154
8. Gefäße	154
9. Epithelien	163
10. Einwirkung der ionisierenden Strahlen auf Entzündung und Wundheilung	170
11. Spezifität der Gewebsveränderungen nach ionisierender Bestrahlung	178
II. Die strahlenbedingten Organveränderungen	179
1. Hautveränderungen durch ionisierende Strahlen	179
Die sogenannten akuten Röntgenschäden	179
Die Röntgen-Spätveränderungen der Haut (sekundär chronische Röntgen-Dermatitis)	185
Die primär chronische Röntgendermatitis	190
Das Röntgen-Spätulcus	191
Carcinome in bestrahlter Haut	194
2. Hämatopoetische Organe	194
3. Lymphatischer Apparat und Thymus	200
4. Milz	205
5. Gonaden	209
Hoden	209
Ovarien	213
6. Respirationstrakt	215
7. Nieren	220
8. Harnblase	229
9. Leber	230
10. Herz	234
11. Gastro-Intestinaltrakt	234
12. Innersekretorische Drüsen	236
13. Übrige Drüsen	239
14. Nervensystem	240
15. Auge	243
III. Strahlen und Krebs	244
Der cancericide Effekt ionisierender Strahlen	244
1. Einleitung	244
2. Die Morphologie bestrahlter Tumoren	245
a) Die Parenchymveränderung	245
b) Die Stromaveränderungen	251
3. Zur Frage der Spezifität der Veränderungen bestrahlter Tumoren	253
4. Die Ausdifferenzierung bestrahlter Tumoren	254
5. Die Beeinflussung der Tumordignität und der Metastasierung	259
6. Direkte und indirekte cancericide Wirkungen ionisierender Strahlen	261
7. Strahlensensibilität und Strahlenprognose maligner Tumoren	262
Literatur	265

	Seite
Biologie und Pathologie des sichtbaren Lichtes, des Ultravioletts und des Infrarots. Von Professor Dr. GUIDO MIESCHER-Zürich. Mit 14 Abbildungen	288
Einleitung	288
I. Die Wirkung der Lichtstrahlen auf die Haut	289
Reflexion	289
Absorption.	290
1. Die Reaktion der Haut auf kurzwelliges UV (2500—3150 Å)	291
Histologie S. 293	
2. Die Reaktion der Haut auf langwelliges UV	295
3. Pigment und Licht	297
Phänomen der Pigmentdunkelung	297
4. Die Wirkung der sichtbaren und infraroten Strahlen auf die Haut	298
5. Die Reaktion der Haut auf Sonnenlicht	299
6. Gewöhnung an Licht	300
7. Die biologische Bedeutung des Lichtschutzes	302
8. Beeinflussung der Lichtreaktion durch konstitutionelle und äußere Einflüsse	303
9. Antagonistische Wirkungen	303
10. Bestimmung der Lichtempfindlichkeit	304
Die Dosis S. 304.	
II. Photodynamische Wirkungen des Lichtes	305
Histologie S. 307.	
III. Photoallergische Phänomene (Photoallergie)	308
1. Ekzematoide Photoallergie	308
2. Urticarielle Photoallergie	309
IV. Die carcinogene Wirkung des Lichtes	310
V. Die Wirkung des Lichtes auf das Auge.	312
VI. Die Wirkung des Lichtes auf Mikroorganismen	313
VII. Allgemeine Lichtwirkung	314
Einleitung	314
Rachitis	315
Kreislauf	316
Atmung	316
Blut	316
Stoffwechsel	316
Grundumsatz S. 316. — Blutzucker S. 317. — Mineralstoffwechsel S. 317.	
Eiweißstoffwechsel S. 317. — Lipoidstoffwechsel S. 317	
Drüsen mit innerer Sekretion.	318
Allgemeinbefinden	318
Infektionsabwehr	318
VIII. Licht als Krankheitsursache	318
Einleitung	318
1. Wirkung des Lichtes bei normaler Lichtempfindlichkeit der Haut	319
2. Wirkung des Lichtes auf die krankhaft lichtempfindliche Haut	319
a) Krankheitserscheinungen auf dem Boden phototoxischer Reaktionen	319
b) Krankheitserscheinungen auf dem Boden photoallergischer Reaktionen	320
c) Idiopathische Lichtkrankheiten.	322
Hydroa vacciniformia S. 322. — Xeroderma pigmentosum S. 323.	
Pellagra	324
3. Licht als provokatorische Noxe	325
Literatur	325
 Die durch elektrischen Strom bedingten Veränderungen am menschlichen Körper. Von Professor Dr. FRITZ SCHWARZ-Zürich. Mit 23 Abbildungen	331
I. Allgemeines	331
II. Die Widerstandsverhältnisse des menschlichen Körpers	336
III. Die durch den Strom erzeugten äußeren Veränderungen	339
1. Niederspannung	339
2. Hochspannung	346

Inhaltsverzeichnis.

IX

	Seite
IV. Stromveränderungen im Innern des Körpers	349
a) Veränderungen an der quergestreiften Muskulatur	350
b) Veränderungen am Knochen und an den Gelenken	351
c) Veränderungen am Nervensystem	353
d) Veränderungen am Auge	357
e) Veränderungen am Ohr	358
f) Veränderungen am Herzen und an den Gefäßen	358
V. Blitzwirkungen	360
VI. Zur Frage der Todesursache	363
Literatur	366
Wetter, Jahreszeit und Klima als pathogenetische Faktoren. Von Professor Dr. B. DE	
RUDDER-Frankfurt a. M. Mit 12 Abbildungen	370
Wetter	371
Jahreszeit	376
Klima	384
Literatur	388
Namenverzeichnis	391
Sachverzeichnis	415

Allgemeine Strahlenbiologie.

Von

HEDI FRITZ-NIGGLI-Zürich.

Mit 56 Abbildungen.

Einleitung.

Energiereiche Strahlen sind imstande, fundamentale Äußerungen der organischen Welt zu ändern. Sie beeinflussen die Gestalt und den Stoffwechsel der Zelle, sie hemmen und unterbrechen die Entwicklung, sie zwingen die Gewebe zur malignen Entartung, und relativ geringe Strahlenmengen töten hochdifferenzierte Lebewesen. Sehr kleine Energiebeträge der Strahlen sind imstande, größte biologische Wirkungen hervorzurufen. Ein Beispiel sei zitiert¹: Wird die Wärmeenergie, die sich in einer Tasse Tee befindet, dem Menschen als Röntgenstrahlung zugeführt, wirkt sie tödlich.

Unmittelbar nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Dezember 1895 erkannte man die große lebensfeindliche Kraft der energiereichen Strahlung und beschäftigte sich in stets steigendem Maße mit der Strahlenbiologie und der Strahlenpathologie. Die energiereichen, ionisierenden Strahlen hielten ihren Einzug in Therapie und Diagnostik, so daß naturgemäß die strahlenbiologische Forschung hauptsächlich in Verbindung mit medizinischen Problemen weiterentwickelt wurde. Als allerdings im Jahre 1927 die mutationsauslösende Wirkung von Röntgen- und Radiumstrahlen endgültig entdeckt wurde, weitete sich die strahlenbiologische Forschung und vermochte das ganze Gebiet der Genetik in fruchtbringender Weise zu fördern. Die zeitlich und räumlich begrenzte Strahlenwirkung erlaubt die Analyse von Entwicklungsabläufen, physiologischen und morphologischen Zusammenhängen und gibt damit wichtigste Aufschlüsse. Die Strahlung dient als Instrument, Äußerungen der organischen Welt zu deuten.

In den letzten Jahren hat weiterhin die strahlenbiologische Forschung an praktischer Bedeutung in ungeahntem Ausmaße zugenommen. Der heutige Mensch ist immer mehr von Strahlen umgeben, einmal weil er sich der Energie des Atomkerns bedienen kann, und dann weil er in Industrie, Forschung und Therapie strahlende Stoffe gebraucht. Die Gefahren der energiereichen Strahlung und die eventuellen Schutzmöglichkeiten für das Lebewesen müssen in aller Klarheit bestimmt werden.

Die strahlenbiologische Literatur² hat sich besonders in den letzten Jahren außerordentlich vermehrt. Es ist nicht möglich, in dieser Übersicht allen Arbeiten gerecht zu werden, sie mag deshalb lediglich als Orientierung über alte und neue Probleme der Strahlenbiologie gelten. Tabellen werden zur Übersicht über dieses Wissensgebiet beitragen.

Die eigentliche Strahlenbiologie beschäftigt sich mit der Reaktion biologischer Systeme auf die Einwirkung energiereicher Strahlung. Sie ist damit vornehmlich

¹ ZIMMER 1958.

² Allgemeine Werke und Symposien über Strahlenbiologie: DUGGAR 1936, LEA 1946, TIMOFÉEFF-RESSOVSKY und ZIMMER 1947, NICKSON 1952, SPEAR 1953, BEHRENS 1953, BACQ und ALEXANDER 1955 a, 1955 b, HOLLAENDER (I, II, III) 1954, 1955, 1956, HAISSINSKY 1955, 1956, RAJEWSKY 1956, 1957, FRIEDRICH und SCHREIBER 1956, MITCHELL et al. 1956, HEVESY et al. 1957, ELLINGER 1957 a, FRITZ-NIGGLI 1959 a.

eine Wissenschaft, die sich auf Experimente stützt. Da aber die Lebewesen stets von ionisierenden Strahlen getroffen werden, ist es nicht abwegig anzunehmen, daß ein gewisser Teil natürlicher Lebensvorgänge stets von energiereichen Strahlen beeinflußt oder sogar hervorgerufen wird. Die energiereiche Strahlung müßte dann als ein organisch wirksamer Bestandteil der Umwelt betrachtet werden. Aufgabe der Strahlenbiologie ist es, den Mechanismus der Strahlenschädigung zu erkennen und gewisse Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Um dem Weg von der Absorption der Strahlenenergie zum biologischen Strahleneffekt genau folgen zu können, ist das Verständnis der Natur der energiereichen Strahlung notwendig.

A. Das Wesen der energiereichen Strahlung.

Im folgenden Abschnitt wird die physikalische Natur der energiereichen Strahlung skizziert. Im übrigen sei auf die umfassenden Darstellungen¹ der physikalischen Grundlagen der Strahlenbiologie verwiesen.

Grundsätzlich läßt sich die energiereiche Strahlung in zwei Klassen einteilen, die allerdings nicht genau voneinander abgegrenzt werden können:

1. Corpuscularstrahlung, die aus atomischen und subatomischen Partikeln besteht, welche sich mit variabler Geschwindigkeit fortpflanzen, und
2. die elektromagnetische Strahlung, die aus Wellen besteht, bei denen die elektrische und magnetische Feldstärke hin und her schwingt, und die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

1. Corpuscularstrahlung.

Die Corpuscularstrahlung wird durch die Masse der Teilchen und deren elektrische Ladung (ausgenommen Neutronen mit der Ladung 0) und deren Geschwindigkeit gekennzeichnet. Die Corpuseel besitzen eine bestimmte Ruhemasse (m) und Geschwindigkeit (v), aus denen die kinetische Energie (E) berechnet wird:

$$E = \frac{1}{2} m v^2. \quad (1)$$

Diese kinetische Energie läßt sich auch als $\varepsilon \cdot e$ ausdrücken, wobei ε die Potentialdifferenz darstellt, die z. B. einer Röntgenröhre erteilt wird, gemessen in elektrostatischen Einheiten (Volts geteilt durch 300) und e die elektrische Ladung des Elektrons in elektrostatischen Einheiten (Tabelle 1). Somit kann die Gleichung auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{e \cdot V}{300} \text{ erg}^*.$$

Beim Durchgang durch die Materie stoßen die Teilchen mit den Atomen zusammen. Sie ändern dabei ihre Richtung und verlieren Energie. Der Weg, den die Partikel bis zur vollständigen Energieabgabe zurücklegen, wird *Reichweite* genannt.

Die Geschwindigkeit der Corpuscularstrahlen ändert sich je nach der kinetischen Energie und der Masse. Sie kann sich der Lichtgeschwindigkeit nähern.

Einige Corpuscularstrahlen:

1. *Elektronen* (Symbol β , Atomgewicht: $5,486 \cdot 10^{-4}$ ** und eine negative Ladung von \bar{e}). Wenn der Materie genügend Energie zugeführt wird, können

¹ Zusammenfassungen und Bücher: LEA 1946, TIMOFÉEFF-RESSOVSKY und ZIMMER 1947, GLOCKER 1949, HAHN 1950, BAUER 1951, GLASSER et al. 1952, FANO 1954, MARINELLI und TAYLOR 1954, GRAEWE 1954, GRAY 1955, HINE und BROWNELL 1956, SCHERRER 1956.

* Ein erg stellt die Einheit der Arbeit dar und ist gleich der Kraft eines Dyn, wirkend über die Distanz von 1 cm.

** Alle Atomgewichte in chemischer Skala angegeben.

Elektronen austreten. Wird in einem evakuierten Gefäß (Kathodenröhre) ein Hochspannungsfeld angelegt und die Kathode auf Weißglut erhitzt, fließen negative Elektronen zu der positiven Anode (Abb. 1). Diese Elektronenbündel werden Kathodenstrahlen oder auch Betastrahlen genannt. Sie lassen sich im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen durch elektrische und magnetische Felder aus ihrer Bahn ablenken.

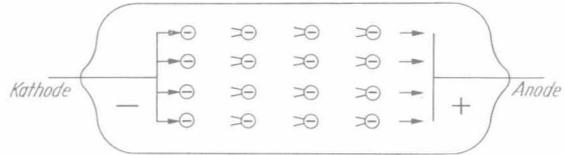


Abb. 1. Entstehung von Kathodenstrahlen (β -Strahlen) in einer evakuierten Kathodenröhre mit hohem Potential. Beim Auftreffen der von der Kathode weggerissenen Elektronen auf die positive Anode entstehen Bremsstrahlen = Röntgenstrahlen.

2. *Protonen* (Symbol p^+ , Atomgewicht: 1,007* und eine positive Ladung von e^+). Atomkerne des leichten Wasserstoffs.

3. *Alpha-Strahlen* (Symbol α , Atomgewicht: 4,003* und die positive Ladung von $2e^+$). Die Partikel der α -Strahlen sind Atomkerne des Heliums mit 2 Protonen und 2 Neutronen.

4. *Neutronen* (Symbol n^0 , Atomgewicht: 1,009* und keine elektrische Ladung). Man kennt schnelle und langsame Neutronen. Schnelle Neutronen bewegen sich mit großer Geschwindigkeit fort und dringen ungestört durch die negative Elektronenhülle der Atome bis zum Kern, von dem sie eingefangen werden können oder lediglich elastisch zusammenstoßen. Nach etlichen Kollisionen reduziert sich die Geschwindigkeit der Neutronen, und sie werden zu langsamen Neutronen.

Tabelle 1. *Einige physikalische Zahlenwerte.*

Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum	=	$2,99790 \cdot 10^{10}$ cm/sec
Plancksche Konstante h	=	$6,624 \cdot 10^{-27}$ erg sec
Avogadro'sche Zahl N (physik. Skala)	=	$6,02544 \cdot 10^{23}$ gmol $^{-1}$
Ladung des Elektrons e	=	$4,80223 \cdot 10^{-10}$ esE
1 eV	=	$1,602 \cdot 10^{-12}$ erg
1 MeV	=	$1,602 \cdot 10^{-6}$ erg
1 erg	=	$6,24 \cdot 10^5$ MeV
1 cm 3 trockene Luft 760 mm Hg, 0 0	=	0,001293 g
Energieverlust bei Erzeugung eines Ionenpaares in Luft = W	=	32,5—35 eV
1 rad	=	100 erg/g
1 r	=	$6,24 \cdot 10^7$ MeV/g
	=	1 esE der Ladung/0,001293 g trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	$2,08 \cdot 10^9$ Ionenpaare/cm 3 trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	$1,61 \cdot 10^{12}$ Ionenpaare/g trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
1 r	=	$6,77 \cdot 10^4$ MeV/cm 3 trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
$W = 32,5$	=	$5,23 \cdot 10^7$ MeV/g trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	83,8 erg/g trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	93 erg/g weiches Gewebe
$W = 34$	=	$7,08 \cdot 10^4$ MeV/cm 3 trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	$5,47 \cdot 10^7$ MeV/g trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	87,7 erg/g trockene Luft (0 0 , 760 mm Hg)
	=	98 erg/g weiches Gewebe

* Alle Atomgewichte in chemischer Skala angegeben.

2. Elektromagnetische Wellenstrahlung.

Im Gegensatz zu den Corpuscularstrahlen pflanzen sich die elektromagnetischen Wellen stets mit der gleichen Geschwindigkeit fort, nämlich mit $c = 299\,790 \text{ km/sec} = \text{Lichtgeschwindigkeit}$. Ein großes Spektrum verschiedener elektromagnetischer Wellen ist bekannt, die sich alle durch ihre Wellenlänge

Wellenlänge in cm		Typ der Strahlung	Frequenz
			10^{-1}
100 000 000 000	10^{11}		10^0
10 000 000 000	10^{10}	Elektrische Wellen	10^1
1 000 000 000	10^9		10^2
100 000 000	10^8		10^3
10 000 000	10^7		10^4
1 000 000	10^6		10^5
100 000	1 km 10^5	Radiowellen	10^6
10 000	10^4		10^7
1 000	10^3		10^8
100	1 m 10^2		10^9
10	10^1		10^{10}
1	1 cm 10^0	Infrarot	10^{11}
0,1	1 mm 10^{-1}		10^{12}
0,01	10^{-2}		10^{13}
0,001	10^{-3}		10^{14}
0,0001	$1 \mu 10^{-4}$		10^{15}
0,00001	10^{-5}	Sichtbares Licht	10^{16}
0,0000001	10^{-6}		Ultraviolett
0,0000001	1 m μ 10^{-7}	Röntgen- Strahlen	10^{17}
0,00000001	1 Å 10^{-8}		10^{18}
0,000000001	10^{-9}	γ -Strahlen	10^{19}
0,0000000001	1 $\mu\mu$ 10^{-10}		10^{20}
0,00000000001	1 X 10^{-11}	Kosmische Strahlen	10^{21}
0,000000000001	10^{-12}		10^{22}

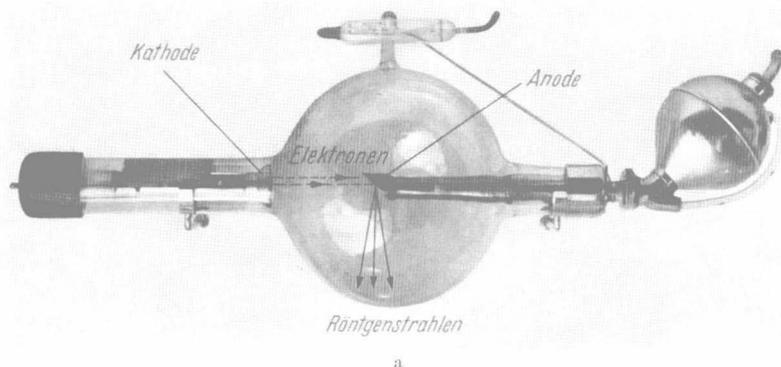
Abb. 2. Spektrum der elektromagnetischen Wellenstrahlung. Die Wellenlängen sind links in Zentimeter angegeben, die Frequenzen in Oscillationen pro Sekunde sind rechts eingetragen.
(Nach GLASSER et al. 1952 umgezeichnet.)

voneinander unterscheiden. Die Wellenstrahlung läßt sich durch ihre Wellenlänge (λ) und Frequenz (ν) charakterisieren, nach der folgenden Formel:

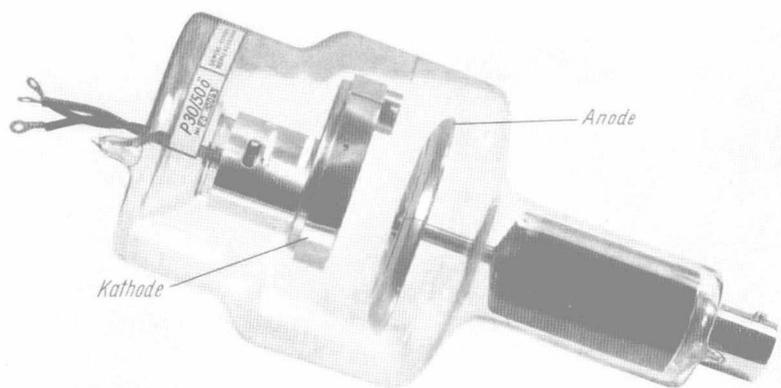
$$\lambda \cdot \nu = c, \quad (1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit darstellt (Tabelle 1). Das Spektrum der elektromagnetischen Wellenstrahlung umfaßt Wellen einer Länge von 100 Milliarden Zentimeter bis zu einem billionstel Zentimeter (Abb. 2). Radiowellen besitzen Wellenlängen von Metern und Kilometern, sichtbares Licht und Ultraviolett eine Wellenlänge von tausendstel bis zehntausendstel Zentimeter. Noch tausend- bis hunderttausendmal kleiner sind die Wellenlängen von Röntgen- und γ -Strahlen.

Je kleiner die Wellenlänge wird, um so mehr nehmen die Energie und Durchdringungsfähigkeit zu. So vermag die Energie des ultravioletten Lichts, das dem kleinstwelligen sichtbaren violetten Licht folgt, bereits Elektronen anzuregen, d. h. in höhere Energiezustände zu führen. Dem Ultraviolett schließen sich die energiereichen oder ionisierenden Strahlen an, die alle beim Durchgang durch die



a



b

Abb. 3a u. b. Röntgenröhren. a Alte Röntgenröhre mit Quecksilberventil (1895—1920). b Moderne Röntgenröhre mit Drehanode. (Aus dem Röntgeninstitut, Kantonsspital Zürich, Direktor: Prof. Dr. H. R. SCHINZ.)

Materie Ionisationen erzeugen, also Elektronen aus der Atomhülle entfernen können.

Die elektromagnetische Wellenstrahlung läßt sich auch als Schwarm kleinster Energiebeträge, den Quanten oder Photonen, beschreiben. Die Energiebeträge, welche die Photonen mit sich führen, hängen von der Strahlenart ab.

Besitzt die Strahlung die Frequenz ν , so kann sie mit folgender Formel charakterisiert werden:

$$E = h \nu, \tag{2}$$

wobei E Energie bedeutet, h das Plancksche Wirkungsquantum mit dem kleinen Wert von $6,62 \cdot 10^{-27}$ erg s. Nach der Gl. (1) kann die Frequenz durch c/λ ersetzt werden, so daß folgende Beziehung resultiert:

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Dies bedeutet im praktischen Gebrauch

$$E = \frac{12,4}{\lambda},$$

wobei die Wellenlänge λ in Å (1 Ångström = 0,1 m μ) und E in keV einzusetzen ist.

Röntgenstrahlen werden durch stark beschleunigte Elektronen erzeugt, die bis in die Nähe des Atomkerns gelangen und durch dessen Kraftfeld stark abgebremst werden (Abb. 1 und 3). Ihre kinetische Energie wird dabei in Quantenenergie umgesetzt, und die Quanten dieser Bremsstrahlen stellen die Röntgenstrahlen dar. Man teilt die Röntgenstrahlen ein in überweiche Strahlen (5 bis 20 keV*), weiche Strahlen (20—60 keV*) mittelharte Strahlen (60—120 keV*), harte Strahlen (120—250 keV*) und überharte Strahlen (über 250 keV)¹. Im

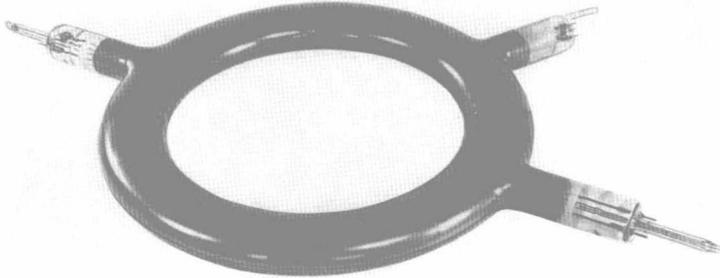


Abb. 4. Kreisröhre eines Zweistrahl-Betatrions (BROWN-Boveri-Betatron, entwickelt von R. WIDERÖE) 2 diametral gelegene Elektronenspritzen.

sog. Betatron werden Elektronen in einer Kreisröhre (Abb. 4) beschleunigt und erhalten bei jedem Umlauf einen Spannungszuwachs, bis die gewünschte Spannung erreicht ist, die bis 100 Millionen Volt betragen kann**.

Radioaktive Substanzen senden γ -Strahlen aus, die ebenfalls bei Reaktionen des Atomkerns entstehen. So emittiert Radium beim Zerfall γ -Strahlen einer Energie von 0,188 MeV und ⁶⁰Kobalt γ -Strahlen mit der Energie von 1,33 MeV.

3. Verhalten der energiereichen ionisierenden Strahlung in der Materie.

Dringt die Strahlung in die Materie ein, so tritt sie in Wechselwirkung mit den Atomen und Molekülen. Während Ultraviolett-Strahlen mit einer Wellenlänge von 2000—3000 Å und einer Photonen-Energie von einigen eV die Elektronen aus der Elektronenhülle der Atome lediglich anregen können, sind energiereiche Strahlen in der Lage, die Elektronen aus dem Atomverband zu entfernen. Das herausgeschleuderte Elektron kann sich an ein anderes Atom anheften. Der Vorgang des Herausschleuderns und Anheften von Elektronen in Atomen und Molekülen wird Ionisation genannt. Bei der Entfernung eines Elektrons bleibt ein positiv geladenes Ion zurück und bei der Anheftung ein negatives Ion.

Corpuscular-, Röntgen- und γ -Strahlen ionisieren direkt, während Neutronen indirekt ionisieren. Die energiereichen Strahlen werden deshalb auch im Gegensatz zu Ultraviolett ionisierende Strahlen genannt.

Die Energie der ionisierenden Strahlen wird auf verschiedene Weise in der Materie absorbiert und verteilt.

¹ KEPP 1952.

* Konventionelle Röntgentherapie.

** Ultraharte Röntgentherapie.

a) Anregung.

Durch die Energiezufuhr wird ein Elektron eines Atoms oder Moleküls in einen höheren Energiezustand gehoben. Das Atom oder Molekül befindet sich dann in einem angeregten Zustand.

b) Photoelektrischer Effekt.

Die gesamte Energie der Photonen kann an das Elektron abgegeben werden, das seinerseits aus der Elektronenhülle als Photoelektron entfernt wird (Abb. 5a

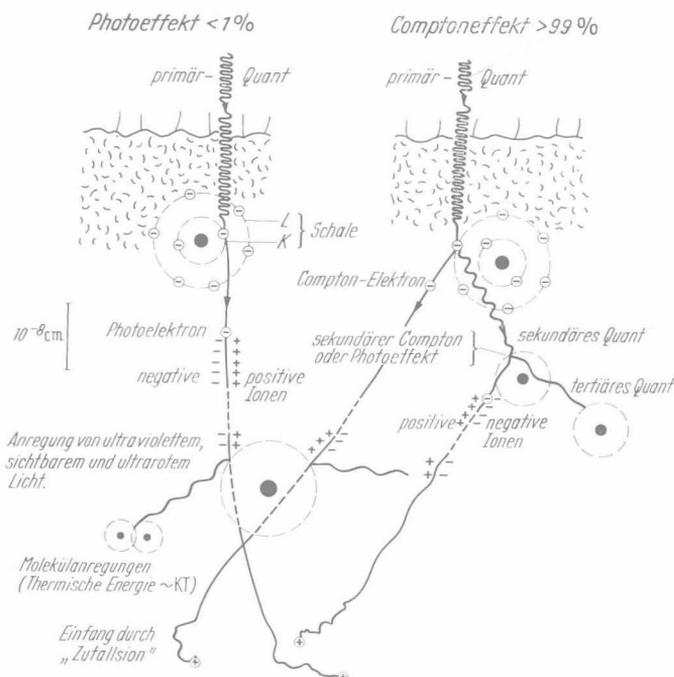


Abb. 5a—c. Absorption von Röntgenstrahlung verschiedener Energie im Gewebe. a Röntgenstrahlen mit einem $h\nu$ von ~ 200 keV. Verschwindend kleiner Photoeffekt, quantitativ maßgebend ist der Compton-Effekt. Mittlere Reichweite des gesamten Strahlenkomplexes im Gewebe etwa 8 cm.

und b, links). Die Photoelektronen ionisieren ihrerseits bei ihrem Durchgang durch die Materie.

Die Strahlenabsorption im photoelektrischen Effekt hängt von der Energie des Quants, von der Dichte und von der Atomnummer Z des absorbierenden Atoms ab. (Die Atomnummer Z gibt die Zahl der positiven Ladungen im Kern des Atoms bzw. die Zahl der negativen Elektronen auf der Hülle an.) Dabei beträgt der photoelektrische Massen-Absorptionskoeffizient nach LEA (1946)

$$\frac{\tau}{\rho} = 0,0089 \left(\frac{Z^{4,1}}{A} \right) \lambda^n.$$

Es sind:

- | | |
|--|--|
| Z = Atomnummer | τ = Absorptionskoeffizient |
| A = Atomgewicht | τ = Massen-Absorptionskoeffizient |
| n = 3,05 für die Elemente H, C, N, O | ρ = Dichte |
| 2,85 für die Elemente Na-Fe | |
| λ = mittlere Wellenlänge in \AA | |

Es lassen sich auch empirisch gefundene einfachere Formeln angeben¹, wie

$$\frac{\tau}{\rho} = C \lambda^3 Z^3,$$

wobei C eine experimentell bestimmte universelle Konstante darstellt. Die Größe der photoelektrischen Absorption wird weitgehend durch die Atomnummer der absorbierenden Materie bestimmt. Je mehr Elektronen bzw. Protonen ein Atom besitzt, um so mehr Strahlung absorbiert es. Gewebe, die vorwiegend aus Atomen mit einer relativ geringen Atomnummer ($H = 1, C = 6, N = 7, O = 8, Na = 11,$

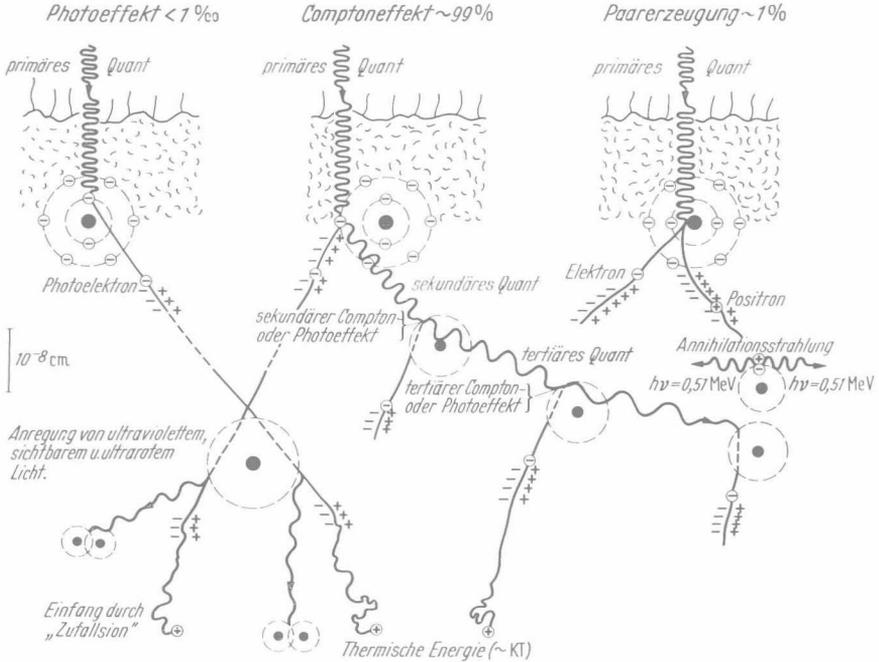


Abb. 5 b. Röntgenstrahlen mit einem $h\nu \sim 2 \text{ MeV}$. Verschwindet kleiner Photoeffekt, quantitativ maßgebend ist der Compton-Effekt. Die mittlere Reichweite der Primär- sowie Sekundärelektronen etwa 25 cm im Gewebe.

$P = 15$) bestehen, absorbieren im Gegensatz zum Knochen mit Elementen wie Calcium = $Z = 20$ weniger Strahlen, so daß sich bei Aufnahmen mit energiearmen Röntgenstrahlen Knochen als Schatten abheben. Blei mit einem Z von 82 schirmt vorzüglich ab und wird deshalb zur Abschirmung von strahlenden Objekten gebraucht.

e) Compton-Effekt.

Der Compton-Effekt läßt sich auffassen und auch quantitativ beschreiben als ein elastischer Zusammenstoß zwischen einem Lichtquant und einem (ruhenden) Elektron (Abb. 5). Dabei kann das Strahlenquant dem Elektron einen Teil seiner Energie abgeben, wobei es selbst mit reduzierter Energie und geänderter Flugrichtung weiterfliegt. Das Compton-Elektron besitzt im Gegensatz zu einem Photoelektron nicht die volle Energie des Strahlungsquants. Es wird auch als Rückstoßelektron bezeichnet.

Die Compton-Absorption läßt sich nach einer Formel von KLEIN und NISHINA (s. LEA 1946) berechnen. Der Absorptionskoeffizient verhält sich etwa proportional der Gesamtzahl der Elektronen in der absorbierenden Materie.

¹ GLOCKER 1949.

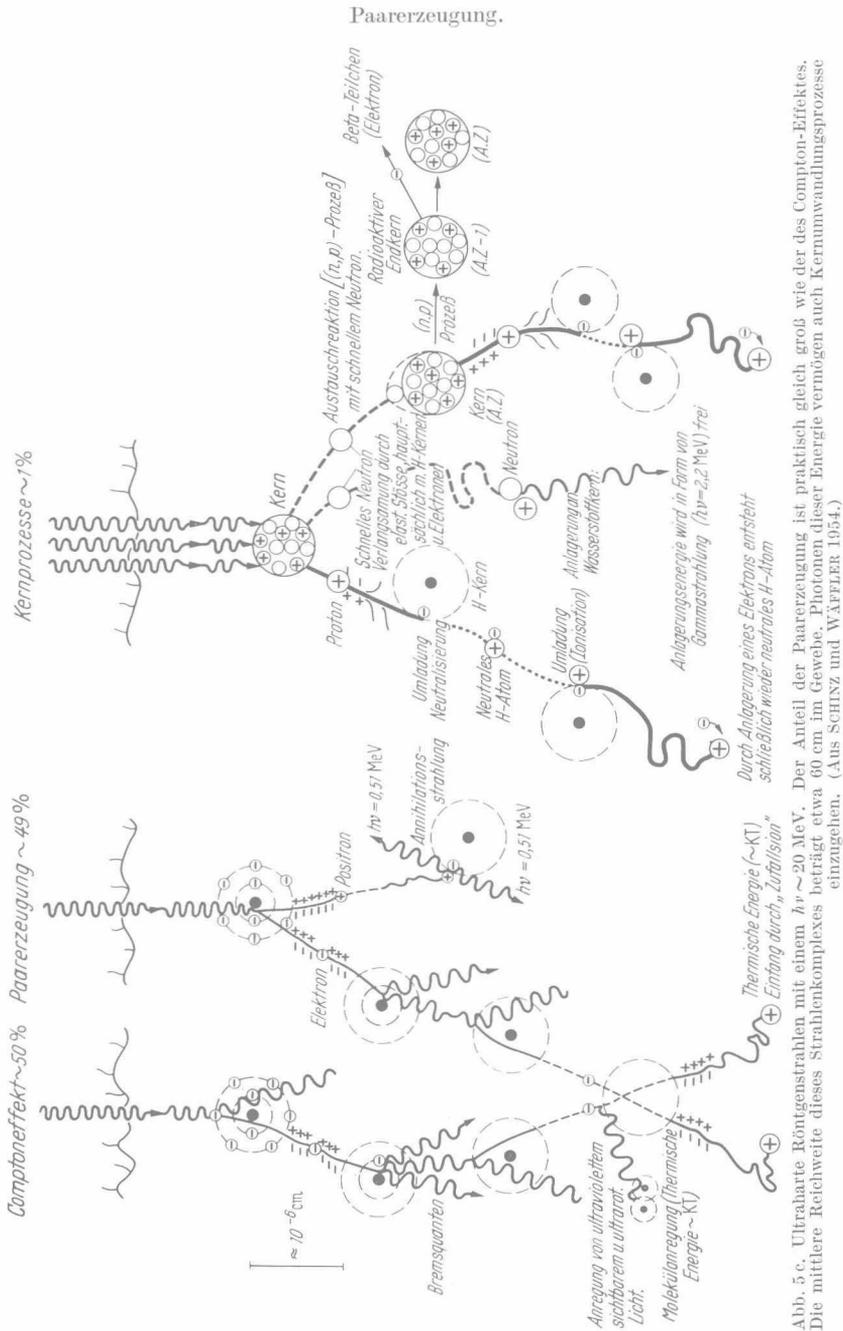


Abb. 5 c. Ultraharte Röntgenstrahlen mit einem $h\nu \sim 20 \text{ MeV}$. Der Anteil der Paarerzeugung ist praktisch gleich groß wie der des Compton-Effektes. Die mittlere Reichweite dieses Strahlenkomplexes beträgt etwa 60 cm im Gewebe. Photonen dieser Energie vermögen auch Kernumwandlungsprozesse einzugehen. (AUS SCHINZ und WÄFFELER 1954.)

Mit steigender Energie der einfallenden Strahlung nimmt der Compton-Effekt zu. Er macht bei 5 keV-Strahlen weniger als 1% der Gesamtabsorption aus, bei 140 keV-Strahlen beinahe 100%.

d) Paarerzeugung.

Übersteigt die Energie der Strahlungsquanten 1,02 MeV, dann spielt sich der Vorgang der Paarerzeugung ab (Abb. 5 b, c). Dieser Effekt stellt eine Material-