

H. SCHREIBER

BIOPHYSIKALISCHE
STRAHLENKUNDE

DEUTSCHER VERLAG DER WISSENSCHAFTEN

BIOPHYSIKALISCHE STRAHLENKUNDE

VON

DR. HABIL. HANS SCHREIBER

**PROF. FÜR BIOPHYSIK
AN DER HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN**

BAND 1

RÖNTGENSTRAHLEN UND RADIOAKTIVITÄT

1957

**VEB DEUTSCHER VERLAG DER WISSENSCHAFTEN
BERLIN**

Vorwort

Das in den letzten Jahren zu beobachtende stetige Anwachsen des Interesses an der Biophysik hat nicht nur zur Folge gehabt, daß an den größeren Hochschulen, Universitäten und anderen wissenschaftlichen Institutionen in aller Welt – teilweise mit sehr großen Mitteln – neue biophysikalische Institute errichtet worden sind. Es hat auch bewirkt, daß sich ein größerer Kreis von Wissenschaftlern, die bisher dieser Grenzwissenschaft ferngestanden haben, mit ihr näher zu beschäftigen beginnt. Immer wieder ist dabei das Bemühen zu bemerken, dieses Fachgebiet zwischen Physik, Medizin und Biologie begriffs- und inhaltsmäßig zu analysieren und auch abzugrenzen. An anderer Stelle [Nr. 28 des Literaturverzeichnisses] habe ich im Rahmen dieser allgemeinen Bestrebungen versucht aufzuzeigen, wie sich die Biophysik zwanglos in unser Gesamtsystem der Wissenschaften einordnet. Ich habe dabei auch dargelegt, daß sich aus verschiedenen Gründen die moderne Biophysik der Strahlungsenergie als eines ihrer wichtigsten Forschungsmittel bedient. Eine Darstellung der Strahlenkunde unter besonderer Berücksichtigung der biophysikalischen Gesichtspunkte erscheint deshalb gerechtfertigt und sogar notwendig.

Das vorliegende Buch ist aus einer einführenden Vorlesung an der Humboldt-Universität zu Berlin entstanden. Es stellt also ebenfalls eine Einführung in das Gebiet der Strahlenkunde dar. Sie wendet sich vor allem an diejenigen, die – von einer der angrenzenden Disziplinen kommend – sich speziell mit Biophysik beschäftigen wollen. Aber auch angehende Strahlentherapeuten und für die Grundlagen ihres Faches interessierte Radiologen sollen angesprochen werden. Die Darstellungsweise des gebrachten Stoffes ist diesen Zielen nach Möglichkeit angepaßt worden. Dieser umfaßt das wichtige und auch hochaktuelle Gebiet der ionisierenden Strahlung. Es ist beabsichtigt, einen zweiten Band folgen zu lassen, in dem in grundsätzlich gleicher Weise die übrigen natürlichen und künstlichen Strahlenarten behandelt werden sollen. Bei der literarischen Hochflut, die besonders hinsichtlich aller Probleme festzustellen ist, die mit Fragen der Atomenergie zusammenhängen, war es nicht möglich, im Literaturverzeichnis auch Einzelveröffentlichungen aufzuführen. Vielmehr konnte nur eine Zu-

sammenstellung der wichtigsten zusammenfassenden Darstellungen und Monographien gebracht werden, von der jedoch gleichfalls nicht behauptet werden kann, daß sie vollständig ist. Die benutzte monographische Literatur ist natürlich lückenlos in ihr enthalten. Besonderer Wert wurde auf Tabellen gelegt, die das Aufsuchen von gebrauchten Zahlenwerten erleichtern sollen. Auf die Zusammenstellung der Tabellenangaben wurde unbeschadet dessen, daß dadurch die Fertigstellung des Manuskripts merkbar hinausgezögert werden mußte, besondere Sorgfalt verwendet. Wo in der Originalliteratur verschiedene, einander widersprechende Angaben zu finden waren, wurden diejenigen verwendet, die mir am zuverlässigsten erschienen. Die Entscheidung darüber war manchmal nicht leicht, und es ist möglich, daß manche Werte noch abgeändert werden müssen, wenn experimentelle Nachprüfungen dies verlangen sollten. Die Tabellen wurden im Text an denjenigen Stellen des Buches untergebracht, an denen auf sie Bezug genommen worden ist. Um den dadurch entstehenden Nachteil zu vermindern, daß bei der Suche nach einer bestimmten Angabe erst die zuständige Tabelle aufgesucht werden muß, ist dem Inhaltsverzeichnis ein besonderes Verzeichnis der Tabellen beigelegt worden, das die Übersichtlichkeit erhöhen soll.

Meiner Frau Dora Schreiber-Bernard danke ich ganz besonders für ihre ausschlaggebende Hilfe bei der Fertigstellung des Manuskriptes. Meiner Mitarbeiterin Fräulein Ingeborg Tertel danke ich für die Anfertigung des Namenverzeichnisses. Fräulein Helene Felski bin ich für ihre Mithilfe beim Lesen der Korrektur dankbar. Dem Verlag gebührt mein Dank für sein entgegenkommendes Verständnis bei der Drucklegung und für die gute Ausstattung des Buches.

Berlin, im Mai 1956

H. Schreiber

TABELLENÜBERSICHT

Tabelle 1. Wellenstrahlungen	16
Tabelle 2. Röntgenspektren der Elemente	42/43
Tabelle 3. Elektronengeschwindigkeit und Beschleunigungsspannung	46
Tabelle 4. Therapeutisch verwendete Röntgenstrahlungen	53
Tabelle 5. Wellenlängenabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten	55
Tabelle 6. Massenstreuoeffizient $\frac{\sigma}{\rho}$	58
Tabelle 7. Schwächung von homogener und inhomogener Strahlung	67
Tabelle 8. Bleiäquivalenzwerte	71
Tabelle 9. Elektronenreichweite im biologischen Gewebe	100
Tabelle 10. Spezifische Ionisation	101
Tabelle 11. Wassergehalt verschiedener Organe und Gewebe	111
Tabelle 12. Funkenschlagweiten	145
Tabelle 13. Korrektur der Funkenschlagweite für Luftdruck und Temperatur	145
Tabelle 14. Röntgendosimeter	161
Tabelle 15. Uran-Radium-Reihe	176
Tabelle 16. Thorium-Reihe	178
Tabelle 17. Actinium-Reihe	180
Tabelle 18. Reichweite von α -Strahlen	190
Tabelle 19. Reichweite von β -Strahlen	195
Tabelle 20. γ -Strahlung natürlicher Strahler	196
Tabelle 21. Schwächungskoeffizienten einer γ -Strahlung von 1,3 MeV	197
Tabelle 22. Halbwertschichten in Blei von Ra- γ -Strahlung	198
Tabelle 23. Komponenten der Ra- γ -Strahlung nach R. Glocker	201
Tabelle 24. Komponenten der Ra- γ -Strahlung nach W. Minder	201
Tabelle 25. Ra-Salze	204
Tabelle 26. Schwächung harter γ -Strahlung	212
Tabelle 27. Wellenlängenabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten	222
Tabelle 28. r -Einheit und absorbierte Energie in Abhängigkeit von der Wellenlänge	226
Tabelle 29. Relative biologische Wirksamkeit	228
Tabelle 30. Periodisches System der chemischen Elemente	243
Tabelle 31. Zahl der beobachteten Kernreaktionen verschiedener Typen	252
Tabelle 32. Energiemasse	255

Tabelle 33. Für Biophysik und Medizin wichtige radioaktive Isotope	256
Tabelle 34. Elementare und instabile Teilchen bei Kernprozessen	263
Tabelle 35. Elementare Zusammensetzung des menschlichen Körpers	268
Tabelle 36. Natürliche stabile Isotopengemische der Elemente	293
Tabelle 37. Beeinflussung von Aminosäuren durch Kathodenstrahlung	316
Tabelle 38. Toleranzdosen	319
Tabelle 39. Zulässiger Neutronenfluß	321
Tabelle 40. Berechnung von Abschirmdicken für eine Dosis von 0,1 r/a bei γ -Strahlern	327
Tabelle 41. Anlagerungsorte von Isotopen im tierischen und menschlichen Organismus	329
Tabelle 42. Mittlere β -Strahlen-Energie	331
Tabelle 43. Toleranzkonzentrationen	331
Tabelle 44. Maximal zulässige Mengen verschiedener Isotope	333
Tabelle 45. Dosis pro Jahr infolge natürlicher Radioaktivität und kosmischer Strah- lung	336

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	V
Tabellenübersicht	XI
I. Einleitung	1
II. Grundbegriffe der Wellenlehre	5
III. Das elektromagnetische Strahlenspektrum	12
IV. Teilchenstrahlungen	19
Neutrale Teilchen	19
Negativ geladene Teilchen	21
Positiv geladene Teilchen	21
V. Das Wesen der Strahlung	24
VI. Röntgenstrahlen	34
a) Entstehung und Eigenschaften	35
1. Das Linienspektrum der Röntgenstrahlen	41
2. Das kontinuierliche Röntgenspektrum	45
3. Röntgenstrahlen und Materie	53
b) Erzeugung der Röntgenstrahlen	72
1. Die Röntgenröhre	72
2. Ventile	86
3. Röntgenapparate	89
c) Wirkungen der Röntgenstrahlen	98
1. Physikalische Wirkungen	98
2. Physikalisch-chemische Wirkungen	106
3. Chemische Wirkungen	110
4. Biologische Wirkungen	118
d) Messung der Röntgenstrahlen	136
1. Die Bestimmung der Strahlenqualität	136
α) Röntgenspektroskopie	136
β) Messung der Röhrenspannung	141
γ) Filteranalyse	146
2. Messung der Strahlenquantität	149
α) Definitionen und Dosiseinheit	150
1. Einfallsdosis	150

2. Oberflächendosis oder Hautdosis	150
3. Streuzusatzdosis an der Oberfläche	151
4. Streuzusatzdosis in der Tiefe	151
5. Tiefendosis oder Herddosis	152
6. Raumdosis oder Volumendosis	153
7. Herdraumdosis	153
β) Ionisationsdosimetrie	155
γ) Andere Methoden zur Dosisbestimmung	162
δ) Praktische Dosimetrie	162
VII. Radioaktivität	167
a) Der Atomkern	168
b) Natürliche Radioaktivität	171
1. Gesetzmäßigkeiten des radioaktiven Zerfalls	171
2. Die radioaktiven Strahlungen	187
α) Die Alphastrahlen	188
β) Die Betastrahlen	191
γ) Die Gammastrahlen	195
δ) Sekundärstrahlen	202
3. Messung der radioaktiven Strahlung	203
α) Meßmethoden	206
α-Strahlen	206
Uran-Normal	206
Ionisationsmessung bei α-Strahlen	207
Ionisationsmessung bei gasförmigen Zerfallsprodukten	208
β- und γ- Strahlen	210
Ionometrische Verfahren	210
Photochemische Verfahren	214
Biologische Verfahren	215
Mathematische Verfahren	216
Messung eines Präparates, das sich nicht im radioaktiven Gleichgewicht befindet	217
β) Dosimetrie	219
4. Gesichtspunkte für die medizinische Anwendung	228
α) Die praktisch wichtigen radioaktiven Elemente	228
β) Technische Voraussetzung für die Applikation	233
γ) Radium-Starkbestrahlung	235
δ) Radium-Schwachbestrahlung	236
ε) Strahlenschutz	238
c) Künstliche Radioaktivität	239
1. Die künstliche Umwandlung der Atomkerne	248
α) Kernreaktionen	250
β) Die an Kernreaktionen beteiligten Elementarteilchen	254
γ) Neutronenstrahlung	265
δ) Technik der Atomzertrümmerung	270

1. Erzeugung hochbeschleunigter Teilchen	270
2. Kernreaktoren	275
3. Nachweismethoden und Energiemessung	282
2. Die Bedeutung der künstlichen Radioaktivität für Medizin und Biologie .	291
α) Chemie der radioaktiven Isotopen	292
β) Die Indikatormethode	299
γ) Die Autoradiographie	304
δ) Radioaktive Isotope in der Therapie	308
ε) Sonstige Anwendungsmöglichkeiten radioaktiver Isotope	312
ζ) Schutzmaßnahmen beim Arbeiten mit radioaktiven Isotopen	317
1. Das Problem der Toleranzdosis	318
2. Bestrahlung durch äußere Strahlenquellen	321
3. Inkorporation von radioaktiven Substanzen	328
4. Radioaktive Verseuchung und gesundheitliche Überwachung	332
VIII. Kosmische Strahlung	336
Literatur	341
Namenverzeichnis	345
Sachverzeichnis	351

I. EINLEITUNG

Der Arzt, der sich am Krankenbett vor die Aufgabe gestellt sieht, in den Ablauf der Erkrankung durch die Verordnung eines Chemotherapeutikums einzugreifen, ist dank des hohen Standes der pharmazeutischen Industrie im Regelfalle in der Lage, auf ein Standardpräparat zurückgreifen zu können. Falls ihm die im Durchschnitt übliche Dosierung zufällig nicht gegenwärtig sein sollte, so findet er Angaben darüber in seinem Arzneiverordnungsbuch, Vademekum, Ärztekalendar usw., wo auch entsprechende Angaben über Indikationen und über die Zusammensetzung des Präparats zu finden sind. Das Medikament selbst liegt handelsüblich gewöhnlich in einer der optimalen Dosierung angepaßten Form vor, so daß der verordnende Arzt meist nur die Zahl der einzunehmenden Tabletten, Tropfen usw. festzulegen hat. Industrie und Apotheker nehmen ihm die Sorge der Herstellung des Mittels und der Mischung aus seinen Bestandteilen ab und stellen es ihm in gebrauchsfertiger Form zur Verfügung.

Bei dem Therapeutikum „Strahlung“ haben wir eine etwas andere Sachlage. Hier kann die Industrie nur die Voraussetzungen schaffen, d.h. nur die Apparate liefern, mit Hilfe derer bei der Krankenbehandlung selbst erst das wirkende Therapeutikum erzeugt wird.

Der Chemotherapeut braucht nicht die chemischen Zusammenhänge und Reaktionen vollständig zu überblicken und zu beherrschen, die bei der Herstellung eines Medikaments eine Rolle spielen. Der Strahlentherapeut dagegen muß nicht nur in der Lage sein, die Apparaturen zur Erzeugung der Strahlen bedienen zu können, sondern er muß auch die Gesetzmäßigkeiten überblicken, die der Entstehung der Strahlung zugrunde liegen und denen die Strahlung selbst und ihr Zusammenwirken mit dem biologischen Objekt unterworfen ist. Nur gründliche Kenntnisse in dieser Beziehung können die Basis einer erfolgreichen Strahlentherapie bilden und ceteris paribus sowohl den Strahlentherapeuten als auch den Patienten vor den Folgen einer unsachgemäßen – um nicht zu sagen dilettantischen – Anwendung der Strahlung bewahren.

Gegenstand der Strahlenkunde sind alle diejenigen Strahlungen, die in der Therapie angewendet werden, ihre Entstehung, ihre Eigenschaften, ihre Erzeugung, ihre Wirkungen in physikalischer, chemischer und natürlich besonders biologischer Hinsicht, ihre Messung und Dosierung und die damit zusammenhängenden Probleme.

Strahlenkunde ist eine sehr wichtige Disziplin. Ihre Beherrschung bildet die unentbehrliche Voraussetzung zu jeder Strahlentherapie und Strahlendiagno-

stik. Sie wendet sich nicht nur an den angehenden Fachspezialisten. Auch der künftige Facharzt anderer Sparten und der spätere Allgemeinpraktiker muß sich wenigstens mit ihren wichtigsten Grundlagen vertraut machen, denn überall spielt Strahlung in der modernen Medizin eine wichtige Rolle. Lediglich die Eindringungstiefe in dieses eine Sonderstellung einnehmende Gebiet ist je nach der Fachrichtung verschieden.

Diese Sonderstellung der Strahlenkunde ist darin begründet, daß sie sich nicht nur mit den medizinischen und biologischen Zusammenhängen befaßt, sondern auch ganz wesentlich auf physikalische Gesetzmäßigkeiten eingehen muß. Letzteres führt dazu, daß die Sprache und die Darstellungsweise der Strahlenkunde anders ist als in den reinen medizinischen Disziplinen und sich mehr oder minder der der reinen physikalischen Fächer angleicht. Formeln und graphische Darstellungen sind nicht zu umgehen. Sie müssen öfter angewendet werden, als es sonst der Mediziner gewohnt ist. Dies ist ein notwendiges und unumgängliches „Übel“, denn genauso wie ein chemisches Lehrbuch ohne die Formeln und Symbole der Chemie undenkbar ist, muß auch bei der Darstellung und Beschreibung eines physikalischen Agens und seiner Gesetze die ihm adäquate Sprache angewendet werden. Sonst käme allenfalls eine feuilletonhafte Abhandlung, aber keine wissenschaftliche Darstellung zustande.

Das 20. Jahrhundert wird immer wieder als das Zeitalter der Strahlen bezeichnet. In der Tat hat sich unser gesamtes heutiges physikalisches Weltbild aus den Entdeckungen der Röntgenstrahlen und der radioaktiven Strahlen entwickelt, die am Ende des vorigen Jahrhunderts die wissenschaftliche Welt in geistige Hochspannung versetzten. Die experimentelle und theoretische Erforschung dieser kurzwelligen Strahlungen vermittelte uns vorher ungeahnte Aufschlüsse und gewährte einen tiefen Einblick in die Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten des Makro- und Mikrokosmos und formte so unser Bild von der physikalischen Welt zu seiner heutigen Gestalt. „Die seit der Jahrhundertwende eingetretene Wandlung gehört mit zu den tiefgreifendsten, die jemals in der Entwicklungsgeschichte einer Wissenschaft stattgefunden haben“ (MAX PLANCK). Dieser „Umsturz im Weltbild der Physik“ ist noch keineswegs abgeschlossen und beendet. Erst vor wenigen Jahren wurde die künstliche Radioaktivität entdeckt. Sie hat uns den Weg eröffnet zu einem ganz neuen wissenschaftlichen Gebiet, der Kernphysik oder auch Kernchemie. Der forschende Geist kann wiederum wissenschaftliches Neuland erschließen und die hier schlummernden, kaum erst geahnten Möglichkeiten zum Nutzen – oder auch vielleicht zum Schaden – der Menschheit nutzbar machen.

In diesem angedeuteten Sinn ist das Wort vom 20. Jahrhundert als dem Zeitalter der Strahlen berechtigt und begründet. Vor dieser Strahlenära war die einschlägige Wissenschaft im wesentlichen auf die in der Natur vorkommenden Wellenlängen des sichtbaren Spektralbereichs angewiesen. Die Bedeutung der Sonnenstrahlung für das Leben ist schon früh in der Menschheitsgeschichte erkannt worden. Das schließen wir aus den religiösen Kultvorstellungen der alten Kulturvölker des Orients, die die natürlichen Lichtquellen als Gottheiten verehrten. Am reinsten und eindrucksvollsten tritt der Sonnenkult wohl bei den Ägyptern hervor, bei denen durch viele Jahrhunderte der Sonnen-

gott unter verschiedenen Namen die höchste Gottheit darstellte. In der klassischen Antike war die Wichtigkeit des Sonnenlichtes für Leben und Gesundheit wohlbekannt. Schon seit dem 5. Jahrhundert v. Chr. zeigten sich bei den Griechen Ansätze zu einer Lichthygiene in der Heilgymnastik. Die Gesundheit der in der Sonne Trainierten gegenüber den im Schatten Aufgewachsenen wurde durch das ganze Altertum hindurch immer wieder gepriesen. HIPPOKRATES (460–377 v. Chr.) empfiehlt in seinen Schriften Luft- und Sonnenbäder zur Behandlung von Wunden und bei Knochenbrüchen. Durch GALENUS (um 200 n. Chr.) wurde die Sonnenbehandlung bis zu den Zeiten des PARACELSUS (gest. 1541) ein fester Bestandteil der ärztlichen Heilkunst. Im Mittelalter ging die Kenntnis der Heilkraft der Sonnenstrahlung leider verloren, wie überhaupt dieser Zeitraum durch eine naturabgewandte Lebensweise gekennzeichnet ist. Erst die Renaissance brachte mit der Wiedererweckung der Kunst- und Geistes-schätze des griechisch-römischen Altertums die Hinwendung des Einzelnen und der Gesamtheit zu Natur und Diesseits und damit auch eine erneute Wertschätzung der natürlichen Heilmittel. Doch erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts setzte in Deutschland die wissenschaftliche Bearbeitung der Lichtwirkungen ein, deren erster Anfang mit den Namen LÖBEL und DÖBEREINER verknüpft ist. In Frankreich hat man vorher um 1770 die Sonnenbehandlung von Beingeschwüren versucht. Die erste Heilstätte für Sonnenlichtbehandlung wurde von dem schweizerischen Naturarzt RICKLI in Veldes im Jahre 1855 eröffnet. 1893 begann der dänische Forscher FINSSEN seine bekannten Arbeiten. Er erkannte zum ersten Male bewußt bei seiner „aktinischen Therapie“ dem ultravioletten Strahlenbereich besondere Bedeutung zu und ersetzte sehr bald die natürliche Lichtquelle der Sonne, die er in seinem Heimatlande zu wenig gehaltvoll an wirksamen Strahlen erkannte, durch den Kohlelichtbogen. Damit war die moderne Lichttherapie geboren, die in der Gestalt der Heliotherapie durch die Arbeiten von O. BERNHARD (1902) und A. ROLLIER (1903) bald in der Wundbehandlung und für chirurgische Tbc zu einem Höhepunkt geführt wurde.

Die konsequente und erfolgreiche Anwendung des ultravioletten Lichtes in der medizinischen Therapie veranlaßte sehr bald die Industrie, sich der Konstruktion und Herstellung künstlicher therapeutischer Lichtquellen zuzuwenden. Die Arbeiten und Erfolge FINSSENS führten so in den skandinavischen Ländern zu einer rationellen Durchbildung der Kohlebogenlampe für medizinische Bestrahlungszwecke. Auch heute noch ist der hohe Grad der Konstruktion dieser der Technik FINSSENS und seiner Schule angepaßten therapeutischen Lichtquellen, die von der skandinavischen Industrie herausgebracht worden sind, noch nicht von der medizinischen Industrie eines anderen Landes erreicht.

In Deutschland ging man in der Lichttherapie andere Wege. Hier wandte man sich der elektrischen Gasentladung zu, insbesondere der zwischen Quecksilberelektroden. Seit der Erfindung des Quarzglases durch KÜCH (1905) trat die Quarzquecksilberdampflampe von Hanau aus ihren unvergleichlichen Siegeszug an und verdrängte andere Formen medizinischer Bestrahlungslampen bis in die letzten Jahre fast völlig vom Markt.

Wie in der Lichttherapie war auch in der Röntgentechnik die gegenseitige Befruchtung von Forschung, Praxis und Industrie für das Tempo der Weiter-

entwicklung bestimmend. Die in den medizinischen Forschungsinstituten und Kliniken erarbeiteten Ergebnisse veranlaßten die Industrie zu Neukonstruktionen. Die neuen Apparate und Instrumente ermöglichten wieder neuartige Fragestellungen bei der Forschung und tiefer schürfende Experimente, deren Resultate dann rückwirkend Ausgangspunkt und Anlaß für weitere Neuentwicklungen wurden. Indem gleichzeitig auch Nachbargebiete in diese Aufwärtsentwicklung einbezogen wurden und so eine gewisse Verbreiterung stattfand, entwickelte sich in den letzten Jahrzehnten jener imposante Stand der Strahlentechnik, wie er sich uns heute darbietet. Charakteristisch bei dieser Entwicklung ist der maßgebende Einfluß der medizinischen und biologischen Anwendung der Strahlung. Bis noch vor wenigen Jahren ging fast jeder Anstoß zu einer industriellen Neuentwicklung auf dem Gebiete der kurzwelligen Strahlen von der Medizin aus. Die Medizin verlangte schon frühzeitig konstantere und immer leistungsfähigere Röntgenröhren und -apparate und veranlaßte damit die Industrie zu entsprechenden Neuschöpfungen. Der Arzt und Biologe stellte die Forderung nach Schutz vor ungewollter Bestrahlung und inaugurierte damit die Ausgestaltung des Strahlen- und Hochspannungsschutzes. Die Strahlentherapie strebte zwecks Erhöhung des Tiefenkoeffizienten bei der Bestrahlung und zur Verbesserung der Erfolgsstatistik bei der Krebsbekämpfung nach immer höheren Röhrenspannungen, nach immer kürzeren Wellenlängen. Die Industrie schlug entsprechende Wege zur Erfüllung dieser Forderung ein. Bis vor 10 oder 15 Jahren waren die anderen Naturwissenschaften mehr oder weniger nur Nutznießer dieser Entwicklung, indem sie für eigene Zielsetzungen auf ihren Arbeitsgebieten die für medizinische Zwecke konstruierten Apparaturen verwendeten. Erst die grundsätzlichen Erkenntnisse der Kernphysik führten dazu, finanzielle Mittel und technische Möglichkeiten speziell für deren Zwecke einzusetzen. Besonders in den kapitalkräftigen und für technischen Fortschritt aufgeschlossenen größeren Ländern entstanden in kurzer Zeit imposante Forschungszentren für Kernphysik, die mit den modernsten Errungenschaften der Physik und Technik ausgestattet wurden. Fast über Nacht war damit der Führungsanspruch in der Weiterentwicklung der Wissenschaft von den Strahlen auf die Physik übergegangen. Die Medizin wurde nun umgekehrt Nutznießerin an den neuen Errungenschaften und Fortschritten ihrer schrittmachenden Schwesterdisziplin, der Physik. Auf dem Gesamtgebiet der künstlichen Radioaktivität, aber auch bei der Anwendung von schnellen Korpustularstrahlen ist diese gegenwärtige Phase der Entwicklung besonders deutlich zu erkennen.

II. GRUNDBEGRIFFE DER WELLENLEHRE

Ein großer Teil der verschiedenen Strahlungen, nämlich alle elektromagnetischen, sind, wie wir noch im einzelnen sehen werden, Wellenbewegungen. Wir müssen uns deshalb einführend mit den wichtigsten Grundlagen der Wellenlehre vertraut machen.

Wir wollen einmal annehmen, daß wir eine Reihe von gleich langen Pendeln vor uns haben, die nach der in der Abb. 1 gezeigten Weise nebeneinander aufgehängt sind. Jedes Pendel bestehe aus einer an zwei Fäden, also bifilar aufgehängten Kugel und sei mit den folgenden durch eine elastische Spiralfeder verbunden. Durch die bifilare Aufhängung wird erreicht, daß eine Schwingung der Pendel nur in einer Ebene erfolgen kann. In der Abbildung wäre diese Schwingungsebene senkrecht zur Papierebene zu denken.

Wenn wir das erste Pendel etwa durch einen Anstoß aus seiner Ruhelage bringen, teilt sich seine Bewegung infolge der Spiralfeder dem zweiten Pendel und den folgenden mit. Man beobachtet also, daß nacheinander auch die übrigen Pendel die gleiche Schwingung wie das erste ausführen, wobei jedes Pendel etwas später mit seiner Bewegung beginnt als das vorangehende. Die dem ersten Pendel erteilte Störung seines Gleichgewichts pflanzt sich also durch die ganze Reihe der Pendel mit einer endlichen Geschwindigkeit fort. Wenn wir zu einem Zeitpunkt, an dem die schwingende Bewegung auch das letzte Pendel der Reihe bereits erfaßt hat, die gleichzeitigen Lagen aller Pendel durch einen Linienzug miteinander verbinden, so stellt dieser eine räumliche Schwingung dar. Tun wir das gleiche einen Zeitmoment später, so können wir feststellen, daß der dann erhaltene Linienzug, die Ortskurve der Pendelkugeln, seine Form zwar behalten hat, aber als Ganzes starr nach rechts gewandert ist. Bezogen auf die Gesamtheit der Pendel stellen wir demnach eine räumlich periodische Schwingung fest, während ein einzelnes eine zeitlich periodische Schwingung ausführt. Wir können dies auch so ausdrücken: Die zeitlich periodische Zustandsänderung des

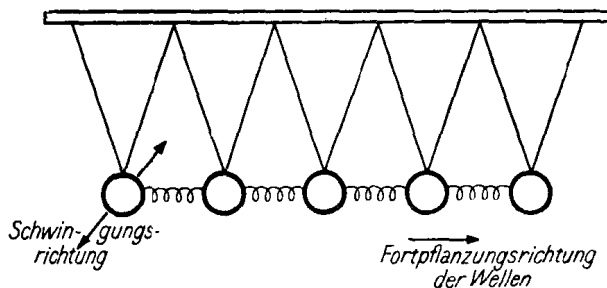


Abb. 1. Entstehung von Transversalwellen

ersten, angestoßenen Pendels pflanzt sich räumlich periodisch über die ganze Pendelreihe fort. Man nennt einen solchen zeitlich und räumlich periodischen Vorgang innerhalb eines Mediums eine **Wellenbewegung**.

Bei einer Welle vollführt jedes Einzelteilchen nur Schwingungen um seine Ruhelage. Es bleibt im Mittel an seinem Ort, *lediglich der Schwingungszustand pflanzt sich durch das Medium fort*.

Die Schwingungen, die die einzelnen Pendel der Abb. 1 ausführen, erfolgen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle. Man nennt eine solche Wellenbewegung eine **Transversalwelle** oder **Querwelle**.

Wenn wir die Aufhängung unserer Pendel in der Art ändern, wie es die Abb. 2 zeigt, so haben wir damit eine wichtige Abänderung unseres Versuchs getroffen. Die einzelnen Pendel können jetzt nur in der Richtung ihrer Ver-

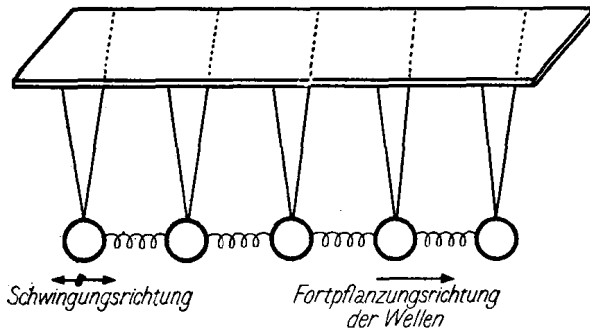


Abb. 2. Entstehung von Longitudinalwellen

bindungsline, also in der Papierebene der Abbildung, schwingen. Wenn wir nun wieder das erste (linke) Pendel durch einen Anstoß aus seiner Ruhelage bringen, so führt es wieder Schwingungen um diese aus. Infolge der elastischen Koppelung durch die Spiralfeder geraten wieder nacheinander auch die übrigen Pendel in den gleichen Schwingungszustand, wobei – wie beim

vorigen Versuch – ebenfalls jedes Pendel mit seiner Schwingung etwas später beginnt als das vorangehende. Die dem ersten Pendel erteilte Gleichgewichtsstörung pflanzt sich auch jetzt durch die ganze Pendelreihe fort. Da aber alle Pendel nur in dieser Fortpflanzungsrichtung schwingen können, ist der Gesamteindruck ein ganz anderer als beim ersten Versuch. An einzelnen Stellen kommt es zu einer Annäherung mehrerer Pendel aneinander (Verdichtung), während gleichzeitig an anderen Stellen die Pendel besonders weit voneinander entfernt sind (Verdünnung). Diese Verdichtungen und Verdünnungen wandern in gleichbleibendem Abstand durch die Pendelreihe; sie stellen die Störung dar, die sich durch die Kette der Pendel fortpflanzt. Da hier die Schwingungsrichtung der einzelnen Pendel in der Fortpflanzungsrichtung der Gesamtwellen liegt, nennt man diesen Vorgang eine **Longitudinalwelle** oder **Längswelle**.

Eine Longitudinalwelle entsteht auch, wenn die Luft an irgendeiner Stelle eines Raumes etwa durch eine angeschlagene Stimmgabel in Schwingungen versetzt wird. Die der Stimmgabel benachbarten Luftteilchen werden etwas zusammengepreßt, d. h., die Dichte der betreffenden Luftstelle wird etwas erhöht. Infolge der Expansionskraft der Luft dehnt sie sich wieder aus, wobei eine Verringerung der Dichte über den ursprünglichen Wert hinaus erfolgt. Die Stimmgabel bringt also Störungen hervor, die in Schwankungen der Dichte bestehen. Durch elastische Kräfte (Volumelastizität) werden die benachbarten Luft-

schichten in Mitleidenschaft gezogen, so daß sich die Störung allmählich vom Störungszentrum aus in alle Richtungen des Raumes ausbreitet.

Wir wollen noch einmal zu den Transversalwellen zurückkehren und die Entstehung von Wasserwellen näher betrachten. Wenn ein Stein in eine ruhige Wasseroberfläche geworfen wird, dann breitet sich von der getroffenen Stelle ein aus wenigen Wellenbergen und Wellentälern bestehender kreisförmiger Wellenzug aus, während am Ausgangspunkt selbst schon nach kurzem Auf- und Abspringen keine Bewegung mehr wahrzunehmen ist.

Bei genauer Betrachtung eines praktisch durchgeführten Versuches bemerken wir, daß diesem Wellenzug eine große Anzahl kleinerer Wellen vorgelagert ist, die sich durch ihr ganzes Aussehen, insbesondere durch ihre Schwingungsweite, einwandfrei von der Hauptwelle unterscheiden. Das Auftreten dieser Haupt- und Nebenwellen kann darauf zurückgeführt werden, daß der stabile Gleichgewichtszustand der Wasseroberfläche durch zwei Kräfte bedingt ist: Durch die Schwerkraft und durch die Oberflächenspannung. Letztere verursacht die Nebenwellen, die *Kapillarwellen* genannt werden. Wir sehen von ihnen ab und betrachten lediglich die Haupt- oder *Schwerewellen*.

Diese Schwerewellen entstehen etwa in folgender Weise: Durch den Stein werden an der Einwurfstelle die von ihm erfaßten Wasserteilchen nach unten gedrückt. Da das Wasser eine praktisch inkompressible Flüssigkeit ist, muß es ringsherum nach oben ausweichen. Die nach unten gedrückten Wasserteilchen erfahren infolge des Auftriebs wieder eine nach oben gerichtete Bewegung. Wenn sie an ihrem ursprünglichen Niveau anlangen, durchschreiten sie es infolge der Trägheit mit einer gewissen Geschwindigkeit. Diese nach oben gerichtete Bewegung hält solange an, bis sich die kinetische Energie wieder vollkommen in potentielle umgewandelt hat. Unter dem Einfluß der Schwerkraft erfolgt dann wieder ein Absinken der Teilchen, wobei es wiederum infolge des Beharrungsvermögens zu einem Überschreiten der ursprünglichen Niveaulage kommt. So vollführen die Wasserteilchen eine Zeitlang eine mehr oder weniger regelmäßige periodische Schwingung um ihre Anfangslage. Infolge der zwischen benachbarten Wasserteilchen bestehenden elastischen Kräfte und unter der Einwirkung der Schwerkraft pflanzt sich die Störung vom Störungszentrum aus entlang der Wasseroberfläche nach allen Seiten fort. Da zur Beeinflussung der Nachbarteilchen eine gewisse Zeit erforderlich ist, werden diese in ihrem Bewegungszustand etwas „nachhinken“, indem sie etwas später ihre tiefste Lage erreichen und auch etwas später wieder den Durchgang durch das ursprüngliche Niveau ausführen. Je weiter ein Teilchen nun vom Zentrum der Störung entfernt ist, desto größer ist diese Zeit des Nachhinkens. Sie ist offenbar gegeben durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Störung im Medium.

Wenn die Störung einmalig und momentan erfolgt, kommt es bald zu einer Wiederherstellung des Gleichgewichtszustands, zuerst im Störungszentrum, dann weiter nach außen von Ort zu Ort fortschreitend. Durch rhythmisch wiederholte Impulse, etwa durch ein periodisches Eintauchen eines Stabes, können wir die Störung im Zentrum auch andauern lassen. Wir zwingen damit den Wasserteilchen eine dauernde Bewegung um ihre natürliche Ruhelage auf und veranlassen dadurch eine andauernde Wellenbewegung der gesamten Wasseroberfläche. Wenn wir uns in diesem Zustand einen Vertikalschnitt durch das

Wasser geführt denken, so erhalten wir das Augenblicksbild der Abb. 3 a, das den Zustand der Wasseroberfläche in Abhängigkeit vom Ort zeigt. In regelmäßigen Abständen wechseln Wellenberge mit Wellentälern ab. Man nennt den Abstand zwischen zwei gleichgerichteten Durchgängen durch die Ruhelage, also den Abstand eines Wellenberges vom nächstfolgenden, die **Wellenlänge** λ der Welle. Wenn wir ein einzelnes bestimmtes Wasserteilchen herausgreifen und dessen Bewegung in Abhängigkeit von der Zeit kurvenmäßig darstellen, erhalten wir einen gleichen Kurvenzug. Es ist aber jetzt nötig, als Maßstab für die Abszisse Zeiteinheiten zu wählen, wie es in Abb. 3 b geschehen ist. Man nennt die Zeit, die ein Teilchen zu einer vollen Schwingung benötigt, also die Zeit zwischen zwei gleichgerichteten Durchgängen durch die Ruhelage, die **Schwingungsdauer** oder auch **Periodendauer**. Die größte Entfernung des

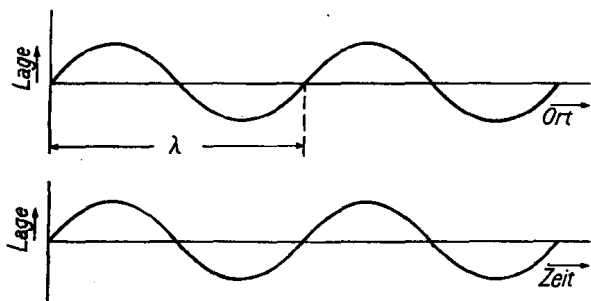


Abb. 3. Wellenbewegung

Teilchens von seiner Ruhelage heißt die **Amplitude** der Schwingung. Die Zahl der Schwingungen, die in der Zeiteinheit, in einer Sekunde, erfolgen, ist die **Frequenz** ν oder auch **Schwingungszahl** des Schwingungsvorgangs. Die Frequenz wird in Schwingungen

je Sekunde gemessen: ihre Einheit ist ein **Hertz** = eine Schwingung in der Sekunde.

Wenn nun in einer Sekunde ν Schwingungen ausgeführt werden und andererseits eine Schwingung eine Wegstrecke von λ bedeutet, so stellt das Produkt $\nu \cdot \lambda$ die Wegstrecke dar, die die Welle in einer Sekunde zurücklegt. Diese Wegstrecke bedeutet aber die **Fortpflanzungsgeschwindigkeit** c der Welle. Wir haben damit die wichtige Beziehung gewonnen

$$\nu \cdot \lambda = c$$

Sie gilt für alle Wellenvorgänge, sowohl für Transversal- als auch für Longitudinalwellen.

Daß bei den longitudinalen Schallwellen fast nur die Angabe der Frequenz üblich ist und nicht die der Wellenlänge, liegt daran, daß nur die erstere ein eindeutiges Maß für die Tonhöhe darstellt. Die Wellenlänge ist dagegen (genau wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit) in hohem Grade von dem Medium abhängig, in dem sich die Schallwellen ausbreiten. In der Luft umfassen die hörbaren Schallwellen einen Wellenlängenbereich von etwa 20 m für die tiefsten bis zu etwa 1 cm für die höchsten Töne. Davon werden für die Musik ausgenutzt die Wellenlängen von 10 m (Kontra C) bis 10 cm (Viergestrichenes a); dem Kamerton a entspricht eine Wellenlänge von etwa 78 cm in Luft.