



Hans Kiefer Winfried Koelzer

# Strahlen und Strahlenschutz

*Vom verantwortungsbewußten Umgang  
mit dem Unsichtbaren*

Dritte Auflage unter Berücksichtigung der neuen  
ICRP-Daten mit 49 zum Teil farbigen Abbildungen  
und 49 Tabellen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg NewYork

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

Professor Dr. Hans Kiefer  
Max-Planck-Str.7  
7514 Eggenstein-Leopoldshafen

Dipl.-Phys. Winfried Koelzer  
Hauptabteilung Sicherheit  
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 36 40, 7500 Karlsruhe 1

ISBN-13:978-3-642-77549-9

e-ISBN-13:978-3-642-77548-2

DOI: 10.1007/978-3-642-77548-2

CIP-Kurzzeitleaufnahme der Deutschen Bibliothek.

**Kiefer, Hans:** Strahlen und Strahlenschutz : vom verantwortungsbewußten Umgang mit dem Unsichtbaren / Hans Kiefer ; Winfried Koelzer. – 3.Aufl., unter Berücks. der neuen ICRP-Daten. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong ; Barcelona ; Budapest : Springer, 1992

ISBN-13:978-3-642-77549-9

NE: Koelzer, Winfried:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1986, 1987, 1992  
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1992

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

Gesamtherstellung: Appl, Wemding  
51/3020 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier.

## Vorwort zur dritten Auflage

Das nicht abflauende Interesse der Öffentlichkeit an Fragen über Strahlen und Strahlenschutz macht eine dritte Auflage dieses Buches notwendig. Zweckmäßig war eine Aktualisierung in einigen Teilen, da die Risiküberlegungen, ein Schwerpunkt dieses Buches, in jüngster Zeit eine Neubewertung durch die Internationale Strahlenschutzkommission und andere internationale Fachgremien erfuhren. Der Grund dafür sind vor allem neue experimentelle und theoretische Erkenntnisse, die zeigen, daß die tatsächliche Strahlendosis in Hiroshima und Nagasaki niedriger war als in der Vergangenheit angenommen und daß jetzt die Ergebnisse der strahlenepidemiologischen Untersuchungen über die Krebssterbefälle der Überlebenden dieser Atombombenabwürfe vorliegen. Die neuen Risikobetrachtungen führen zu neuen Empfehlungen für Grenzwerte im Strahlenschutz, die wohl früher oder später in die Strahlenschutzregelungen der einzelnen Staaten aufgenommen werden.

Wenn der Leser bei seiner Meinungsbildung aus diesem Buch lernen konnte, ob er sich auf wissenschaftlich gesicherte Tatsachen, auf Extrapolationen oder sogar nur auf Spekulationen abstützen muß, sind wir Autoren zufrieden und hoffen, auch mit dieser dritten Auflage zur Verbreitung der Information und Versachlichung der Diskussion auf dem Gebiet des Strahlenschutzes beitragen zu können.

Karlsruhe, im März 1992

Hans Kiefer  
Winfried Koelzer

# Vorwort zur zweiten Auflage

Die Ereignisse um Tschernobyl haben gezeigt, wie dringend notwendig eine sachliche Information über die Strahlen- und Strahlenschutzproblematik ist. Überall waren von der Bevölkerung Meinungsträger und Meinungsbildner wie Lehrer und Ärzte gefordert, die die Frage, ob Tschernobyl für uns eine echte oder nur scheinbare Gefahr darstellt, auch quantitativ korrekt beantworten sollten. Das galt umso mehr, da durch widersprüchliche Aussagen in den Medien und von Politikern Verunsicherung und Mißtrauen gegenüber offiziellen Angaben aufkamen.

Das große Interesse an der ersten Auflage dieses Buches zeigte, daß der Leser besonderen Wert auf eine differenzierte Information zu diesem komplexen Thema legt, um sich selbst ein Urteil bilden zu können. Die Autoren hoffen, auch mit der zweiten Auflage den Wünschen und Bedürfnissen der Leser nachzukommen, insbesondere durch das neue Kapitel „Der Reaktorunfall in Tschernobyl und seine Auswirkungen in der Bundesrepublik Deutschland“, ein Thema, das nicht nur in Fachkreisen noch viele Jahre Diskussionspunkt sein dürfte.

Karlsruhe, im März 1987

Hans Kiefer  
Winfried Koelzer

# Vorwort zur ersten Auflage

Was ist Strahlenschutz? Nüchtern betrachtet ist er auf der einen Seite nichts anderes als ein Teil des allgemeinen Arbeitsschutzes ähnlich dem Lärmschutz am Arbeitsplatz, auf der anderen Seite aber auch Teil des Umweltschutzes vergleichbar dem Schutz vor Emissionen schädlicher Substanzen mit Abwasser oder Fortluft aus beispielsweise Klär- oder Müllverbrennungsanlagen.

Unser Buch ist für alle die geschrieben, die wissen wollen, was hinter dem Begriff steckt. Wir haben uns bemüht, die Probleme so darzustellen, daß keine tieferen physikalischen und biologischen Vorkenntnisse zum Verständnis des Buches notwendig sind. Als Ergänzung sind aber im Anhang alphabetisch geordnet Erklärungen einschlägiger physikalischer und dosimetrischer Begriffe zusammengefaßt.

Zu Anfang des Jahrhunderts erzeugte die erfolgreiche Anwendung von Röntgenstrahlen eine begeisterte Zuwendung zu den Strahlen. Diese unkritische Begeisterung wurde bald durch Todesfälle beim Umgang mit Röntgenstrahlen überschattet, und sie schlug um in eine Furcht vor Strahlen nach dem Schrecken der Kernbombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki. Dank intensiver Strahlenschutzforschung können wir heute wissenschaftlich fundierte Anweisungen über den Umgang mit Strahlen geben. Es gibt kaum einen Bereich im Arbeits- und Umweltschutz, der so gut erforscht ist wie der Strahlenschutz.

Strahlenschutz im Hauptberuf betreiben nur wenige. Unseren Kollegen können wir mit diesem Buch höchstens einige Anregungen für Mitarbeiterbelehrungen bieten, die auch Teil des Strahlenschutzes sind. Aber etwa ein Prozent unserer Bevölkerung kommt beruflich mit ionisierender Strahlung in Berührung, muß also im eigenen Interesse einiges vom Strahlenschutz verstehen. Die ganze Bevölkerung ist in sehr unterschiedlichem Maße der natürlichen Strahlenexposition sowie bewußt zumindest bei Röntgendiagnosen einem erhöhten Strahlenpegel ausgesetzt und damit betroffen. Strahlenfurcht entsteht durch Veröffentlichung von Halbwahrheiten, indem Hypothesen als Fakten dargestellt werden, qualitativ richtige aber quanti-

tativ falsche Aussagen behauptet werden oder Ja-Nein-Aussagen statt wahrscheinlichkeitsbezogener Extrapolationen erfolgen. Ein Ziel dieses Buches soll es deshalb sein, den Leser zum kritischen Leser in Strahlenschutzfragen zu machen.

Unser Dank gilt all denjenigen, die uns im Laufe unseres Strahlenschutzberufslebens – freiwillig oder unfreiwillig – zu den Erfahrungen verhalfen, die es uns ermöglichten, dieses Buch zu schreiben. Danken wollen wir aber auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Hauptabteilung Sicherheit des Kernforschungszentrums Karlsruhe, die uns bei der Erstellung des Manuskriptes, bei Tabellen und Abbildungen unterstützten sowie dem Springer-Verlag für die verständnisvolle Zusammenarbeit.

Karlsruhe, im April 1986

Hans Kiefer  
Winfried Koelzer

# Inhaltsverzeichnis

I.	Die Erforschung der strahlenden Natur . . . . .	1
	1. Röntgen entdeckt die X-Strahlen . . . . .	1
	2. Becquerel entdeckt die Uran-Strahlen . . . . .	4
	3. Die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität . . . . .	10
II.	Der Nachweis ionisierender Strahlung – Das Spinhthariskop, der Geiger-Zähler, der Phoswich-Detektor . . . . .	14
	1. Was müssen wir messen? . . . . .	14
	2. Die Einheiten im Strahlenschutz . . . . .	15
	3. Die Messung der Strahlenintensität . . . . .	17
	3.1 Die Gasisationsdetektoren: Das Geiger-Rohr und seine Abwandlungen . . . . .	17
	3.2 Die Szintillationsdetektoren . . . . .	20
	3.3 Die Neutronendetektoren . . . . .	22
	4. Die Messung der Strahlendosis . . . . .	24
	4.1 Die Dosisleistungsmessung . . . . .	25
	4.2 Die Dosismessung . . . . .	27
	5. Die Bestimmung der Strahlenenergie . . . . .	32
	6. Der Weg eines ionisierenden Teilchens wird sichtbar . . . . .	36
III.	Welchen Strahlen aus der Natur sind wir ausgesetzt? . . . . .	41
	1. Strahlen, die von außen auf uns wirken . . . . .	41
	1.1 Strahlung aus dem Weltall . . . . .	41
	1.2 Strahlung auf der Erde . . . . .	48
	2. Strahlende Materie in unserem Körper . . . . .	57
	2.1 Radionuklide aus dem Weltall . . . . .	57
	2.1.1 Tritium im Wasserkreislauf . . . . .	58
	2.1.2 Beryllium-7 in der Luft . . . . .	58
	2.1.3 Kohlenstoff-14 im Kohlenstoff-Kreislauf . . . . .	59
	2.1.4 Natrium-22 in Nahrungsmitteln . . . . .	60



2.2 Die Radionuklide in der Erde . . . . .	60
2.2.1 Die Nuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium . . . . .	60
2.2.2 Das gasförmige Radon . . . . .	61
2.2.3 Das Isotop Kalium-40 . . . . .	64
2.2.4 Natürliche Spaltprodukte . . . . .	65
2.2.5 Radionuklide in der Flugtasche von Kohlekraftwerken . . . . .	66
3. Wir fassen zusammen: Die natürliche Strahlenexposition	69
 IV. Vom Menschen erzeugte und genutzte Strahlenquellen . . .	70
1. Ionisierende Strahlen in der medizinischen Praxis . . . . .	70
1.1 Medizinische Diagnose mit Röntgenstrahlung . . . . .	70
1.2 Die Anwendung von Radioisotopen und die Strahlentherapie . . . . .	73
2. Kernwaffentests erzeugen Radioaktivität . . . . .	74
3. Strahlenexposition im Beruf . . . . .	80
4. Ionisierende Strahlung von Bildschirmgeräten und Industrieprodukten . . . . .	84
4.1 Ist der Fernsehapparat eine Strahlenquelle? . . . . .	85
4.2 Selbstleuchtende Zifferblätter an Uhren und Anzeigegeräten . . . . .	87
4.3 Rauchmelder nach dem Ionisationsprinzip . . . . .	89
4.4 Strahlender Zahnersatz . . . . .	89
4.5 Glas und Keramik als Strahlenquelle im Haushalt . . .	90
5. Wie gefährlich ist die Kerntechnik? . . . . .	90
5.1 Strahlenschutz bei Kernkraftwerken . . . . .	90
5.2 Emissionen bei der Wiederaufarbeitung . . . . .	94
5.3 Emissionen bei der Herstellung von Brennelementen	98
6. Natürliche und künstliche Strahlenquellen – ein Vergleich . . . . .	99
 V. Auch bei Strahlung: Die Dosis macht's . . . . .	101
1. Die Auswirkung der Strahlung auf den Menschen . . . . .	101
1.1 Strahlengefahr im Bergwerk . . . . .	101
1.2 Die erste erkannte Strahlenkrankheit: Röntgenshäden . . . . .	102
1.3 Strahlenerkrankungen bei Radiumstreicherinnen und Thorotrast-Patienten . . . . .	104

1.4	Schäden bei Überlebenden der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki . . . . .	105
1.5	Frühschäden durch Strahlenexposition . . . . .	106
2.	Strahlenbiologie – ein wichtiger Forschungszeitweig . . . . .	109
2.1	Grundzüge der Strahlenbiologie . . . . .	109
2.2	Biologische Effekte nach Einwirkung von Strahlen . . . . .	112
2.2.1	Wirkungen ab einem Schwellenwert . . . . .	113
2.2.2	Wirkungen auch bei niedriger Dosis? . . . . .	113
2.2.3	Strahlenbedingte Entwicklungsstörungen im Embryo . . . . .	118
VI.	Risikoabschätzung . . . . .	120
1.	Voraussetzungen für Strahlenschutzempfehlungen . . . . .	120
2.	Die Abschätzung des Risikos . . . . .	122
3.	Grundsätze für den Strahlenschutz . . . . .	124
4.	Strahlenschutzgrenzwerte der Internationalen Strahlenschutzkommission . . . . .	127
4.1	Der Weg zu unseren heutigen Grenzwerten . . . . .	128
4.2	Dosisgrenzwerte der ICRP-Empfehlung von 1990 . . . . .	129
4.2.1	Dosisgrenzwerte der ICRP für beruflich strahlenexponierte Personen . . . . .	129
4.2.2	Dosisgrenzwerte der ICRP für die Bevölkerung . . . . .	131
4.2.3	Grenzwerte der ICRP von 1990 und der Strahlenschutzverordnung von 1989 . . . . .	133
4.3	Die abgeleiteten Grenzwerte . . . . .	134
VII.	Der Reaktorunfall in Tschernobyl und seine Auswirkungen in der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	137
1.	Die Reaktoranlage . . . . .	137
2.	Unfallentwicklung und -ablauf . . . . .	137
3.	Radioaktiver Quellterm und Aktivitätstransport . . . . .	140
4.	Auswirkungen in der Umgebung . . . . .	141
5.	Aktivitätsmeßwerte in der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	143
6.	Daten zur Dosisberechnung . . . . .	146
7.	Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland durch den Tschernobyl-Unfall . . . . .	148
7.1	Externe Strahlenexposition . . . . .	148
7.2	Dosis durch Inhalation . . . . .	149

7.3 Dosis durch Nahrungsmittelverzehr . . . . .	150
7.4 Gesamtexposition . . . . .	150
8. Bewertung der Empfehlungen für Aktivitätskonzentrationsrichtwerte in Nahrungsmitteln .	151
9. Tschernobyl heute . . . . .	153
Erklärung physikalischer Fachausdrücke . . . . .	161
Erklärung dosimetrischer Fachausdrücke . . . . .	167
Weiterführende und ergänzende Literatur . . . . .	171
Sachverzeichnis . . . . .	175

# I. Die Erforschung der strahlenden Natur

## 1. Röntgen entdeckt die X-Strahlen

Mit dem akademischen Jahr 1894/95 ging auch das Rektorat des Professors für Physik an der Julius-Maximilian-Universität Würzburg, Wilhelm Conrad Röntgen, zu Ende. Er fand nun wieder Zeit, Experimente mit Kathodenstrahlen aufzunehmen. Ihre Natur war noch nicht bekannt, die spezifische Ladung des Elektrons noch nicht bestimmt.

Röntgen experimentierte allein. Er erzeugte die Kathodenstrahlen in verschiedenen Vakuumröhren, wobei ein Funkeninduktor nach Ruhmkorff als Ladungsquelle diente. Zum Strahlennachweis verwendete er einen Leuchtschirm oder Fotoplatten. Die innerhalb von etwa zwei Monaten gewonnenen Ergebnisse reichte Röntgen am 28. Dezember 1895 handschriftlich beim Sekretär der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg ein. Sie gingen sofort in Druck. Der Artikel begann mit der folgenden Beschreibung:

„Über eine neue Art von Strahlen (vorläufige Mittheilung)

1. Läßt man durch eine Hittorfsche Vakuumröhre oder einen genügend evakuierten Lenardschen, Crookesschen oder ähnlichen Apparat die Entladungen eines größeren Ruhmkorffs gehen und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Karton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen in die Nähe des Apparates gebrachten, mit Bariumplatinzyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoreszieren, gleichgültig ob die angestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungsapparat zugewendet ist. Die Fluoreszenz ist noch in 2 m Entfernung vom Apparat bemerkbar . . .

2. Das an dieser Erscheinung zunächst Auffallende ist, daß durch die schwarze Kartonhülse, welche keine sichtbaren oder ultravioletten Strahlen des Sonnen- oder des elektrischen Bogenlichtes durchläßt, ein Agens hindurchgeht, das imstande ist, leb-



Abb. 1. Die Hand des Anatomen Geheimrath von Kölliker in Würzburg. Aufgenommen im Physikalischen Institut der Universität Würzburg am 23. Januar 1896 mit X-Strahlen von Professor Dr. W. C. Röntgen

hafte Fluoreszenz zu erzeugen, ... Man findet bald, daß alle Körper für dasselbe durchlässig sind, aber in sehr verschiedenem Grade ...“

Röntgen beschreibt dann die unterschiedliche Durchlässigkeit verschiedener Materialien wie Papier, Holz, einiger Metallfolien unterschiedlicher Dicke. Er sieht, daß außer seinem Leuchtschirm auch andere Stoffe wie Kalkspat, Steinsalz, Glas, aber auch Uranglas, zum Leuchten angeregt werden. Er stellt die Strahlenempfindlichkeit seiner fotografischen Trockenplatten fest, kann keine Ablenkung dieser „X-Strahlen“ im Magnetfeld finden, auch keine Reflexion. Er erwähnt als Beweis der geradlinigen Ausbreitung dieser Strahlen „Schattenbilder, deren Erzeugung mitunter einen ganz besonderen Reiz bietet“, so von Handknochen (Abb. 1), von einem in einem Kästchen eingeschlossenen Gewichtssatz und einem Metallstück, dessen Inhomogenität sichtbar wird. Nach Interferenzerscheinungen hat er „viel gesucht, aber leider, vielleicht nur infolge der geringen Intensität derselben, ohne Erfolg“.

Einen Selbstversuch beschreibt er so:

„Die Retina des Auges ist für unsere Strahlen unempfindlich; das dicht an den Entladungsapparat herangebrachte Auge bemerkt nichts, wiewohl nach den gemachten Erfahrungen die im Auge enthaltenen Medien für die Strahlen durchlässig genug sein müssen“.

Er schließt den Beitrag mit den Sätzen:

„Sollten nun die neuen Strahlen nicht longitudinalen Schwingungen im Äther zuzuschreiben sein? Ich muß bekennen, daß ich mich im Laufe der Untersuchung immer mehr mit diesem Gedanken vertraut gemacht habe und gestatte mir dann auch diese Vermutung hier auszusprechen, wiewohl ich mir sehr wohl bewußt bin, daß die gegebene Erklärung einer weiteren Begründung noch bedarf“.

Die Entdeckung der Röntgenstrahlung war für die Entwicklung der modernen Physik von großer wissenschaftlicher Bedeutung; so wurde damit später etwa die Feinstrukturanalyse von Kristallen und der Materie überhaupt möglich. Daß es sich nicht um „eine neue Art von Strahlen“ (also X-Strahlen), nicht um „longitudinale Schwingungen im Äther“ handelte, zeigte von Laue, experimentell unterstützt von Friedrich und Knipping, durch Interferenzerscheinungen mit Röntgenstrahlen erst 17 Jahre später. Das Experiment bewies, daß es sich vielmehr um elektromagnetische Transversalwellen handelt, vergleichbar dem sichtbaren Licht, nur mit einer wesentlich kürzeren Wellenlänge.

Es war nicht die wissenschaftliche Bedeutung der Entdeckung der Röntgenstrahlen, die schon am 5. Januar 1896 die Wiener Presse un-

ter der Überschrift „Eine sensationelle Entdeckung“ berichten ließ. Vielmehr war es der alte Traum der Menschheit, Verborgenes sichtbar zu machen oder wie es in der „Frankfurter Zeitung“ hieß, „es sei ein neuer Lichtträger gefunden, welcher die Beleuchtung hellen Sonnenscheins durch Bretterwände und die Weichteile eines tierischen Körpers trägt, als ob dieselben von kristallhellem Spiegelglase wären“. Aber schon in den ersten Monaten wurde auf die Diagnosemöglichkeit von Knochenkrankheiten und Knochenverletzungen hingewiesen. Dies wurde von Militärärzten angesprochen, als Röntgen am 13. Januar 1896 seine Versuche in Berlin der kaiserlichen Familie im Kreise eines interessierten und sachkundigen Publikums vorführte.

Schnell wurden die beschriebenen Experimente in physikalischen Instituten auf der ganzen Welt wiederholt, denn sie stellten wegen des relativ geringen Aufwandes kein besonderes Problem dar. Die Mediziner fühlten sich aufgerufen, alle Möglichkeiten dieser neuen Diagnosemethode zu nutzen, obwohl mit den einfachen Kathodenstrahlröhren und Hochspannungserzeugern Belichtungszeiten zwischen zehn Minuten und einer Stunde notwendig waren. Allein im Jahre 1896, dem Jahr nach Röntgens erster Publikation, erschienen schon 1044 Mitteilungen und wissenschaftliche Arbeiten zur Röntgenstrahlung und ihrer Anwendung.

Dieses Interesse beschleunigte wieder die technische Entwicklung, aber erst seit 1905 kann man von einer Röntgenröhrentechnik reden, die Röhren ausreichender Energie und Intensität liefert.

## 2. Becquerel entdeckt die Uran-Strahlen

Eine andere, neue Strahlenart wurde etwa gleichzeitig, am 1. März 1896, von Antoine-Henri Becquerel entdeckt. Die Entdeckung der Radioaktivität war zwar zufällig in dem Sinne, daß nicht nach der Eigenschaft „Radioaktivität“ gesucht wurde. Sie war aber doch das Ergebnis gezielter Untersuchungen über Fluoreszenz und Phosphoreszenz an Uranverbindungen.

Es war schon lange bekannt (Davy, 1822), daß Kathodenstrahlen, die in einer Entladungsröhre auf der gegenüberliegenden Glaswand auftreffen, das Glas zu grüner Fluoreszenz anregen. Als dann am 27.01. 1896 die Entdeckung Röntgens vor den Mitgliedern der Pariser Académie des Sciences vorgetragen wurde, zogen sowohl Henri Poincaré als auch A.-H. Becquerel in Erwägung, ob nicht ein direkter Zusammenhang zwischen der Fluoreszenz und den Röntgenstrahlen

besteht. Becquerel, der wie sein Vater die Fluoreszenz- und Phosphoreszenz untersuchte, prüfte diese Vermutung, indem er auf lichtdicht verpackte Fotoplatten das im Sonnenlicht stark fluoreszierende Kaliumuranyl-sulfat aufbrachte. Er setzte die Versuchsanordnung der Sonne aus und fand erwartungsgemäß eine Schwärzung der Fotoschicht.

Am 26. Februar 1896 bereitete Becquerel einen neuen Versuch vor, der aber wegen des bedeckten Himmels am 26. und des nur kurzen Sonnenscheins am 27. nicht vollständig durchgeführt wurde. Die Fotoplatte mit Uransalz wurde zur späteren Versuchsfortführung in eine Schublade gelegt. Als am 1. März die Sonne wieder schien, wurden die Versuche fortgesetzt, vorher aber – um einwandfreie Versuchsbedingungen zu schaffen – die Fotoplatte gewechselt. Die Entwicklung zeigte nun trotz der Lagerung im Dunkeln eine Schwärzung der alten, nicht dem Sonnenlicht ausgesetzten Fotoplatte, die erstaunlicherweise sogar stärker war als bei vorangegangenen Versuchen mit Sonnenlicht. Die Abbildung 2 zeigt diese historische Platte mit den vom Uran erzeugten Schwärzungen und den heller gebliebenen Stellen, an denen ein Kupferkreuz die Strahlung absorbierte. Die Notizen sind die von Becquerel handschriftlich eingetragenen.

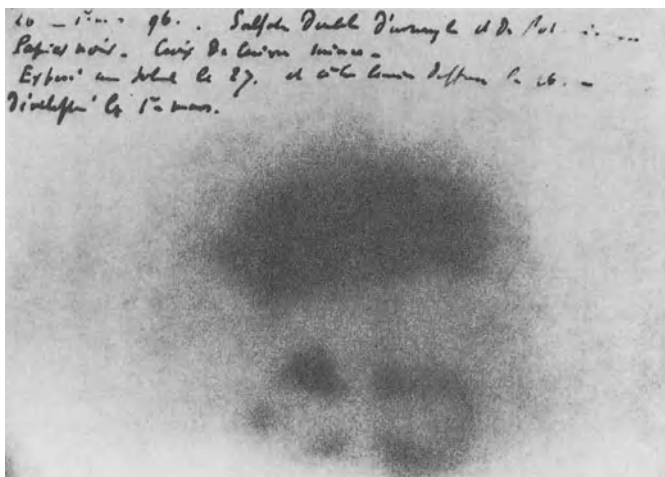


Abb. 2. Die fotografische Platte, die zur Entdeckung der Radioaktivität führte. (Die Notizen im oberen Teil sind die handschriftlichen Versuchsbedingungen von Becquerel: „26. février 96. Sulfate Double d'uranyl et de Potassium. Papier noir. Croix de Cuivre mince. – Exposé au soleil le 27. et à la lumière diffuse le 26. – Développé le 1<sup>er</sup> mars“)



genen Versuchsbedingungen (26 février 96. Sulfate Double d'uranyl et de Potassium. Papier noir. Croix de Cuivre mince. – Exposé au soleil le 27. et à la lumière diffuse le 26. – Developpé le 1er mars.). Weitere Untersuchungen zeigten, daß die Schwärzung der Fotoplatten unabhängig davon war, ob phosphoreszierende oder nichtphosphoreszierende Verbindungen benutzt wurden, solange sie nur Uran enthielten. Becquerel vermutete, daß vom Uran eine eigene, bisher nicht bekannte Strahlung ausginge. Diese Strahlung wurde „Rayons uraniques“ oder, ab 1898, „Rayons de Becquerel“ genannt.

Becquerel konnte dann in den folgenden Wochen zeigen, daß es sich um „ionisierende Strahlen“ handelt, – ein Begriff, den J.J.Thomson bei Versuchen mit Röntgenstrahlen verwendete. Er führte ähnlich wie Röntgen Absorptionsversuche mit festen Körpern durch und fand schließlich, daß auch metallisches Uran diese Strahlung aussendet.

Schon 1858 beschrieb der Neffe des Erfinders der Fotografie, C.F.A.Niepce de Saint-Victor, daß mit Uranylнитrat hergestellte Zeichnungen, die im Dunkeln auf mit Silberchlorid getränktes Papier gelegt wurden, sich darauf abbildeten. Eine Erklärung für diese Erscheinung hatte er nicht, einen Zusammenhang mit der Lumineszenz des Uranylнитrats hielt er jedoch für unwahrscheinlich. A.Ditte erklärte 1884 diese Versuche mit einer unsichtbaren Strahlung, die das Uranylsalz aussendet, und war damit schon recht nahe an Becquerels Entdeckungen.

Die jungen Wissenschaftler Pierre und Marie Curie waren von der Entdeckung Becquerels sehr beeindruckt. Im Sommer 1897 begann Marie Curie als Becquerels Doktorandin die Untersuchung der Ionisationswirkung der Uranstrahlen von verschiedenen Uranverbindungen und uranhaltigen Erzen. Sie setzte dazu ein von ihrem Mann und ihrem Schwager Jacques Curie entwickeltes piezoelektrisches Elektrometer ein. Schon nach einigen Wochen konnte sie zeigen, daß die Strahlungsintensität nur proportional der Uranmenge und unabhängig von der verwendeten Uranverbindung ist. Auch einen Einfluß von Licht und Temperatur konnte sie ausschließen.

Überraschend war dabei aber die Feststellung, daß selbst reines Uranmetall eine geringere Strahlenintensität zeigte als manche Uranerze (Abb. 3, S. 157), die einen geringeren Urangehalt hatten. Insbesondere die Pechblende aus Johanngeorgenstadt und Joachimsthal mit einem Urangehalt von 60 bis 90% Uranoxid ( $U_3O_8$ ) zeigte eine sehr hohe Strahlungsintensität. Marie Curie schloß daraus, daß mindestens ein weiterer anderer strahlender Stoff in der Pechblende vorhanden sein mußte. Die Suche unter den bekannten Elementen führ-

te im April 1898 zur Entdeckung der Strahlenemission des Thoriums – unabhängig von, aber eine Woche nach der Entdeckung durch C. Schmidt. Doch die Pechblende enthielt kein Thorium! Die Suche nach einem noch unbekanntem, strahlenden Element, das in der Pechblende enthalten sein mußte, war im Sommer 1898 erfolgreich. Das Ehepaar Pierre und Marie Curie schlug den Namen Polonium vor, „du nom du pays d’origine de l’un de nous“, wie es wörtlich in der Veröffentlichung über die Entdeckung heißt. Und am 26.12. 1898 folgte von ihnen die Mitteilung über die Entdeckung einer weiteren strahlenden, oder, wie sie zur Benennung vorschlugen, radioaktiven Substanz, des Radiums.

Diese Entdeckungen riefen großes Aufsehen in der wissenschaftlichen Welt hervor. Sie regten zahlreiche Forscher an, radioaktive Mineralien genauer chemisch zu analysieren. Im gleichen Jahr, 1898, entdeckte A. Debiere das Actinium, 1899 fanden Rutherford und Owens bei ihren Untersuchungen thoriumhaltiger Substanzen eine gasförmige radioaktive Substanz, die sie Thorium-Emanation nannten. Das beschleunigte die Suche nach immer neuen radioaktiven Stoffen und bereits 1903 waren über ein Dutzend bekannt. In einer umfassenden Arbeit stellte Rutherford sie in – zum Teil spekulativen – Zerfallsreihen zusammen (Abb. 4).

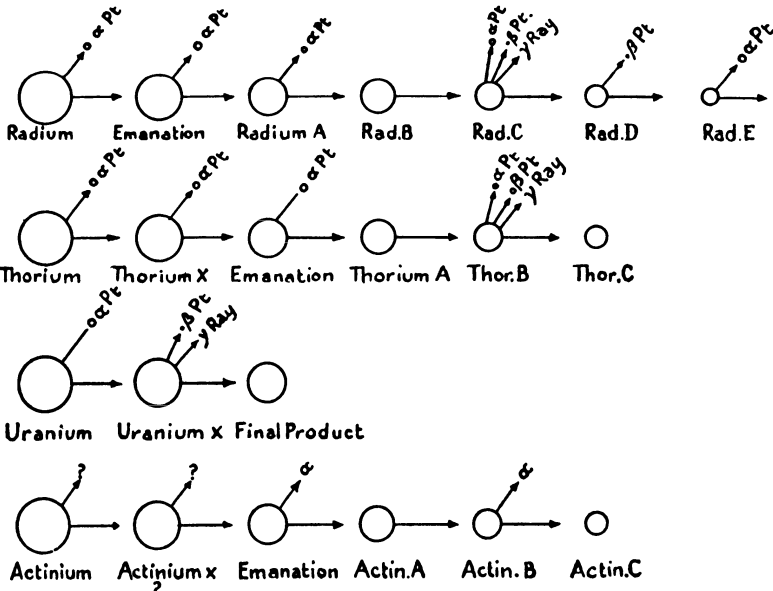


Abb. 4. Zerfallsreihen natürlich radioaktiver Stoffe nach E. Rutherford, 1904

Während die Chemiker nach neuen Elementen suchten, waren die Physiker daran interessiert, das Wesen dieser „Uran-Strahlen“ zu ergründen. Man erkannte sehr bald, daß die „Uran- oder Becquerel-Strahlen“, wie man sie inzwischen nannte, keine einheitlichen Strahlen sein konnten. Pierre Curie zeigte 1900, daß die Strahlen, die Polonium aussendet, nur einige Zentimeter Reichweite hatten, während Radiumquellen in wesentlich größeren Abständen noch ein Elektrometer entladen. Rutherford stellte bei der Radiumstrahlung eine komplexe Abhängigkeit des Durchdringungsvermögens von der Dichte und der Ordnungszahl des durchstrahlten Materials fest.

Eine weitere Aufklärung brachten dann die Ablenkversuche der Strahlung im Magnetfeld, die Becquerel mit Fotoplatten und besonders Rutherford mit Elektrometern als Nachweisgerät durchführte. Die gefundene Vielzahl von im Magnetfeld leicht und weniger leicht ablenkbaren Strahlen, von Strahlen geringer oder großer Durchdringungsfähigkeit mußte irgendwie geordnet werden. Meyer und von Schweidler schreiben in ihrem Buch „Radioaktivität“ 1916 dazu:

„In diese verwirrende Menge von Einzelergebnissen brachte 1902 eine fundamentale Arbeit E. Rutherfords Ordnung. Er deutete alle diese Strahlungserscheinungen in folgender Weise:

Es gibt:

- $\alpha$ )** Strahlen, gebildet aus positiv geladenen rasch fliegenden materiellen Partikeln der Größe des Heliumatoms, die wenig ablenkbar sind im magnetischen bzw. elektrischen Felde und zwar im Sinne der „Kanalstrahlen“.
- $\beta$ )** Strahlen, gebildet aus elektrisch negativen Korpuskeln (Elektronen), die relativ stark ablenkbar sind, je härter (je weniger absorbierbar), desto weniger, die in voller Analogie stehen zu den „Kathodenstrahlen“.
- $\gamma$ )** Strahlen, die sich als unablenkbar erweisen und keine Ladungen tragen.

Die Bezeichnung als  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlen ist erhalten geblieben.“

Eine schöne Geschichte für die Namensgebung der ionisierenden Strahlen. Aber so nicht ganz richtig. Denn schon am 1. September 1898 – also vier Jahre früher – schreibt Rutherford – veröffentlicht im Philosophical Magazine, Januar 1899 –:

„These experiments show that the uranium radiation is complex, and that there are present at least two distinct types of radiation – one that is very readily absorbed, which will be termed for convenience the  $\alpha$ -radiation, and the other of a more penetrative character, which will be termed the  $\beta$ -radiation.“

Daß Alphastrahlen tatsächlich Heliumkerne sind, bewiesen 1909

Tabelle 1. Zeittafel der Entdeckung natürlicher Radionuklide

Jahr	Entdecker	Historischer Name	Heutige Bezeichnung
1896	Becquerel	Uran	
1898	Schmidt	Thorium	
	Curie	Polonium	Po-210
		Radium	Ra-226
	Debieerne	Actinium	Ac-227
1899	Rutherford/Owens	Emanation (Thoron)	Rn-220
1900	Dorn	Emanation (Radon)	Rn-222
1902	Rutherford/Soddy	Thorium X	Ra-224
1903	Giesel	Emanation (Actinon)	Rn-219
1904	Rutherford	Radium A	Po-218
		Radium B	Pb-214
		Radium C	Bi-214
		Thorium B	Pb-212
		Thorium C	Bi-212
	Debieerne	Actinium B	Pb-211
	Brooks/Rutherford	Actinium C	Bi-211
	Giesel	Actinium X	Ra-223
1905	Bragg/Kleeman	Radium A	Po-218
	Hahn	Radiothor	Th-228
	Rutherford	Radium E	Bi-210
1906	Boltwood	Ionium	Th-230
	Hahn	Thorium C'	Po-212
		Radium D	Pb-210
		Radioactinium	Th-227
	Campbell/Wood	Kalium	K-40
		Rubidium	Rb-87
1907	Hahn	Mesothor I	Ra-228
		Mesothor II	Ac-228
1908	Hahn/Meitner	Actinium C''	Tl-207
1909	Hahn/Meitner	Radium C'	Po-214
		Radium C''	Tl-210
		Thorium C''	Tl-208
1910	Geiger/Rutherford	Uran I	U-238
		Uran II	U-234
	Geiger/Marsden	Thorium A	Po-216
		Actinium A	Po-215
1911	Antonoff	Uran Y	Th-231
1913	Fajans/Göhring	Uran X <sub>1</sub>	Th-234
		Uran X <sub>2</sub>	Pa-234
	Marsden/Wilson	Actinium C'	Po-211
1918	Hahn/Meitner	Protactinium	Pa-231
1921	Hahn	Uran Z	Pa-234