

LINDNER · KERN- UND RADIOCHEMIE

# KERN- UND RADIOCHEMIE

GRUNDLAGEN · PRAKTISCHE METHODEN  
UND TECHNISCHE ANWENDUNG

VON

**ROLAND LINDNER**

LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR KERNCHEMIE  
DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE GÖTEBORO/SCHWEDEN

MIT 140 ABBILDUNGEN



SPRINGER-VERLAG  
BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG  
1961

ISBN-13: 978-3-642-87163-4 e-ISBN-13: 978-3-642-87162-7  
DOI: 10.1007/978-3-642-87162-7

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 1961  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1961

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

## Vorwort

Vorliegendes Buch gibt den Inhalt unserer zweisemestrigen Vorlesung in Kernchemie und Radiochemie an der hiesigen Technischen Hochschule wieder. Der entsprechende Unterricht galt ursprünglich Hörern der Fachabteilungen Chemie, Elektrizitätslehre und Mechanik sowie Medizinern der hiesigen Universität, hat sich aber in den letzten Jahren hauptsächlich auf Chemiker und Technische Physiker beschränkt.

Der Mangel an zusammenfassenden Darstellungen des umfangreichen Gebietes in *einer* Schrift führte zunächst zu einem Manuskript in schwedischer Sprache, dann zur Übersetzung ins Deutsche. Seit der Fertigstellung des ursprünglichen Manuskriptes hat sich der Mangel an deutschsprachiger Literatur auf unserem Arbeitsgebiet verringert [so sind u. a. inzwischen Bücher über die kernchemischen Grundlagen, über die Analyse des zu radiochemischen Trennungen so oft verwendeten Ionenaustauschverfahrens, über Einzelheiten der Kernbrennstoffaufbereitung und über die Berücksichtigung des Strahlenschutzes bei Arbeiten mit hochradioaktiven Stoffen erschienen, vgl. Literaturhinweise Kap. 1—3: 4, Kap. 7: 20 und Kap. 9: 9 und 14].

Dennoch haben wir von dem ursprünglichen Plan einer zusammenfassenden Darstellung nicht Abstand genommen, da wir es für wesentlich halten, den Studierenden eine im Umfang noch einigermaßen leicht zu bewältigende Einführung in das gesamte Fachgebiet in die Hände zu geben. Die Form einer *Einführung* führt mit sich, daß wir von dem üblichen System der Literaturhinweise in Form von Zitaten Abstand nehmen. Jedoch erwies es sich als zweckmäßig, zumindest die Namen einiger Verfasser an den entsprechenden Textstellen zu erwähnen. (Bei der gedrängten Auswahl sind möglicherweise führende Forscher ungenügend oder überhaupt nicht erwähnt worden.)

Ein Literaturanhang umfaßt die speziellen Monographien sowie die Zeitschriftenliteratur auf dem Fachgebiet, anhand welcher leicht zur Originalliteratur vorzudringen ist.

Vorlesung und Buch sollen:

1. die für die Durchführung experimenteller Arbeiten notwendigen Kenntnisse vermitteln;

2. die Hörer mit den Möglichkeiten von Kernchemie und Radiochemie bei der Lösung von Fragen, die früher oder später in ihrem Arbeitskreis auftauchen können, vertraut machen;

3. eine erste Einführung geben für Chemiker, Physiker und Ingenieure, die später in der Kerntechnik arbeiten wollen.

4. Schließlich wendet sich das Buch an den Praktiker, der sich schnell einen Überblick verschaffen will.

Für Physiker dürften die Kapitel über kernphysikalische Grundlagen trivial sein, während Hinweise auf analytische und physikalisch-chemische Grundlagen dem Chemiker nichts Neues bieten werden. Dies — wie auch stellenweise Überschneidung mit dem Inhalt der hiesigen Kurse in Reaktortechnik — mußte in Kauf genommen werden, um eine einigermaßen abgeschlossene Darstellung zu erreichen.

Für Ratschläge bei der Durchsicht einiger Kapitel der Korrekturen danke ich den Herren Proff. Dr. H. NEUERT (Hamburg) und E. GLUECKAUF (Harwell). Von den Mitarbeitern des Institutes haben sich dankenswerter Weise die Herren Civ.ing. T. LAGERWALL, Dipl.-Chem. W. KNOCH und Dipl.-Phys. HJ. MATZKE an Korrekturarbeiten beteiligt. Frä. C. DIRKSEN-SCHWANENLAND danke ich für die mühsame Arbeit beim Ausschreiben des Typoskriptes; dem Springer-Verlag für das verständnisvolle Entgegenkommen bei der Drucklegung.

Göteborg, Oktober 1960

R. LINDNER

# Inhaltsverzeichnis

|   |       |
|---|-------|
|   | Seite |
| Einleitung, Nomenklaturfragen . . . . . | XI    |

## Kapitel 1

### Das Atom und der Atomkern

|   |    |
|---|----|
| 1. Ladung und Masse des Elektrons . . . . .                                       | 1  |
| 2. Einiges zur Entdeckung der Radioaktivität und der Natur der $\alpha$ -Strahlen | 3  |
| 3. $\alpha$ -Teilchen als Projektil; die Rutherfordsche Streuformel . . . . .     | 5  |
| 4. Nukleonen; Eigenschaften des Atomkerns . . . . .                               | 7  |
| 5. Massenspektroskopie und das Energieäquivalent der Masse . . . . .              | 9  |
| 6. Massendefekt und Bindungsenergie, das „Energietal“ . . . . .                   | 11 |
| 7. Die Struktur des Atomkerns, Kernmodelle . . . . .                              | 14 |
| 8. Einiges zur Natur der Kernkräfte . . . . .                                     | 19 |

## Kapitel 2

### Radioaktivität

|   |    |
|---|----|
| 9. Energetik und Kinetik des radioaktiven Zerfalls . . . . .                    | 21 |
| 10. Die Zerfallsreihen natürlicher Radionuklide . . . . .                       | 25 |
| 11. $\alpha$ -Strahlung und $\alpha$ -Umwandlung . . . . .                      | 29 |
| 12. $\beta$ -Umwandlung; das Positron; Elektroneneinfang . . . . .              | 36 |
| 13. $\beta$ -Strahlen und ihre Absorption . . . . .                             | 38 |
| 14. $\beta$ -Spektren, das Neutrino, Zerfallsenergien und -konstanten . . . . . | 41 |
| 15. Kernanregung und Kernisomerie, $\gamma$ -Strahlung und innere Umwandlung    | 46 |
| 16. Absorption von $\gamma$ -Strahlung, $\gamma$ -Spektren . . . . .            | 49 |

## Kapitel 3

### Kernreaktionen

|   |    |
|---|----|
| 17. Induzierte Kernreaktionen . . . . .                                       | 52 |
| 18. Der Zwischenkern; Kernenergieniveaus; Wirkungsquerschnitt . . . . .       | 55 |
| 19. Beschleuniger für Kernumwandlungen . . . . .                              | 58 |
| 20. Kernreaktionen, hervorgerufen durch Ionen und $\gamma$ -Quanten . . . . . | 64 |
| 21. Entdeckung und Eigenschaften des Neutrons; Neutronenquellen . . . . .     | 69 |
| 22. Neutroneninduzierte Reaktionen . . . . .                                  | 71 |
| 23. Die Uranspaltung und ihre Entdeckung . . . . .                            | 75 |
| 24. Zur Theorie der Kernspaltung . . . . .                                    | 77 |

## Kapitel 4

### Kernkettenreaktionen und Kernreaktoren

|  |    |
|--|----|
| 25. Kernkettenreaktionen . . . . .   | 82 |
| 26. Einiges über Wahl und Anordnung von Brennstoff und Moderator . . . . . | 85 |
| 27. Mögliche Reaktortypen . . . . .  | 87 |

|   | Seite |
|---|-------|
| 28. Forschungsreaktoren: Beispiele . . . . .                    | 88    |
| 29. Energiebedarf der Welt; Wärme- und Kraftreaktoren . . . . . | 92    |
| 30. Stand der Kraft- und Brutreaktorentwicklung . . . . .       | 99    |
| 31. Kernverschmelzung, kosmisches Vorkommen . . . . .           | 102   |
| 32. Kernverschmelzungsversuche . . . . .                        | 104   |

### Kapitel 5

#### Strahlengefährdung und Strahlenschutz

|  |     |
|--|-----|
| 33. Einheiten der Bestrahlungsdosis; die als maximal zulässig betrachteten Werte . . . . . | 110 |
| 34. Natürliche Strahlenbelastung; Einflüsse der Zivilisation . . . . .                     | 114 |
| 35. Aufnahme und Abgabe radioaktiver Stoffe (Inkorporation und Dekorporation) . . . . .    | 115 |
| 36. Einwirkung äußerer Strahlung; Strahlenschäden und ihre Behandlung .                    | 120 |
| 37. Strahlenschutz durch Abschirmung . . . . .   | 122 |
| 38. Strahlungsüberwachung . . . . .  | 124 |

### Kapitel 6

#### Radioaktivitätsbestimmungen

|   |     |
|---|-----|
| 39. Allgemeines zur Technik radioaktiver Messungen . . . . .  | 127 |
| 40. Gasionisations-Detektoren . . . . .                       | 128 |
| 41. Szintillationsdetektoren . . . . .                        | 136 |
| 42. Impulszähler, Aufbau und Hilfsanordnungen . . . . .       | 139 |
| 43. Statistische Schwankungen radioaktiver Meßwerte . . . . . | 141 |
| 44. Der Wirkungsgrad von Meßanordnungen . . . . .             | 144 |
| 45. Bestimmung der Energie radioaktiver Strahlung . . . . .   | 148 |
| 46. Kernphotoemulsionen und ihre Verwendung . . . . .         | 156 |

### Kapitel 7

#### Übliche Verfahren der Radiochemie

|  |     |
|--|-----|
| 47. Besonderheiten der Radiochemie und ihrer Trenn- und Herstellungsverfahren . . . . .                | 159 |
| 48. Isotopenaustausch . . . . .  | 161 |
| 49. Fällung und Adsorption auf Fällungen . . . . .   | 163 |
| 50. Radiokolloide . . . . .  | 170 |
| 51. Die Bedeutung von Redoxreaktionen für radiochemische Trennungen .                                  | 175 |
| 52. Komplexbildungsreaktionen und ihre Verwendung in der Radiochemie .                                 | 177 |
| 53. Extraktionsverfahren . . . . .   | 180 |
| 54. Ionenaustauschgleichgewichte . . . . .   | 185 |
| 55. Ionenaustauschkinetik; Ionenaustauscherkolonnen . . . . .  | 194 |
| 56. „Kombinierte“ Trennverfahren . . . . .   | 200 |
| 57. Rückstoßeffekte von Kernumwandlungen als Trenn- und Darstellungsmethode für Radionuklide . . . . . | 205 |
| 58. Hilfsmittel bei radiochemischen Arbeiten . . . . .   | 214 |
| 59. Weiteres zur Identifikation von Radionukliden . . . . .  | 215 |
| 60. Zur Praxis in radiochemischen Laboratorien . . . . .   | 217 |

## Kapitel 8

**Wichtige Systeme der Radiochemie**

|   | Seite |
|---|-------|
| 61. Radionuklidproduktion (Änderung der Kernladungszahl) . . . . .    | 224   |
| 62. Radionuklidproduktion ohne Änderung der Kernladungszahl . . . . . | 227   |
| 63. Einiges zur Chemie der Radioelemente. . . . .                     | 229   |
| 64. Zur analytischen Chemie von Uranspaltprodukten . . . . .          | 232   |
| 65. Transurane: Neptunium und Plutonium . . . . .                     | 239   |
| 66. Transurane: Americium bis Californium . . . . .                   | 247   |
| 67. Transcaliforniumelemente . . . . .                                | 251   |

## Kapitel 9

**Chemische Kerntechnik (Reaktorchemie)**

|  |     |
|--|-----|
| 68. Besondere Gesichtspunkte bei der Arbeit mit hochradioaktiven Stoffen | 256 |
| 69. Kernbrennstoffaufbereitung, Allgemeines . . . . .                    | 262 |
| 70. Trennungen aus wäßrigen Lösungen . . . . .                           | 264 |
| 71. Hochtemperaturtrennverfahren . . . . .                               | 273 |
| 72. Reaktorwerkstoffchemie . . . . .                                     | 276 |
| 73. Fragen der Betriebs- und Strahlenchemie des Kernreaktors . . . . .   | 283 |
| 74. Radioaktive Abfalls- und Nebenprodukte . . . . .                     | 290 |

## Kapitel 10

**Anwendung von Kernstrahlung und Leitisotopen in Technik und Wissenschaft**

|  |     |
|--|-----|
| 75. Technische und industrielle Verwendung von Radionukliden . . . . . | 296 |
| 76. Die Verwendung von Radionukliden in der Medizin . . . . .          | 301 |
| 77. Terrestrische und kosmische Altersbestimmung . . . . .             | 306 |
| 78. Einige Beispiele aus chemischer Forschung . . . . .                | 312 |
| 79. Verwendung von Radionukliden in der Festkörperchemie . . . . .     | 318 |
| 80. Angewandte Strahlenchemie . . . . .                                | 325 |
| 81. Aktivierungsanalyse. . . . .                                       | 328 |
| 82. Neutronenabsorptionsanalyse; Isotopenverdünnungsanalyse . . . . .  | 334 |
| Tabellenzusammenstellung. . . . .                                      | 339 |
| Liste einiger Symbole und Abkürzungen . . . . .                        | 349 |
| Literatur . . . . .  | 352 |
| Namenverzeichnis . . . . .   | 362 |
| Sachverzeichnis . . . . .  | 364 |



# Einleitung

*Zum Inhalt:*

Die vorliegende Darstellung umfaßt folgende Kapitel:

Zunächst kurze Hinweise auf für den Chemiker wichtige Kenntnisse des *Atomkerns*. Danach werden die „spontanen“ Kernreaktionen, also die natürliche und künstliche *Radioaktivität* und die dabei ausgesandten Strahlen behandelt. Von induzierten *Kernreaktionen* werden hauptsächlich die durch Bestrahlung mit Neutronen hervorgerufenen und die technisch nutzbaren *Kernkettenreaktionen* besprochen. Soweit das Gebiet der *Kernchemie* im engeren Sinne.

Auch der Chemiker braucht heutzutage Kenntnisse der technischen Ausnutzung der Kernreaktionen, der „*Kerntechnik*“. Hierbei beschränkt sich die Darstellung hauptsächlich auf eine Angabe über konventionelle *Spaltreaktoren*.

*Strahlenschutz* und *Messtechnik* bilden den Übergang zur „*Radiochemie*“, d.h. der Wissenschaft vom chemischen Arbeiten mit radioaktiven Atomarten.

Dieser Teil berührt zwangsläufig die durch Wechselwirkung mit der Radiochemie erzielten Fortschritte der anorganischen und analytischen Chemie, insbesondere auf dem Gebiet der Komplexbildungsreaktionen und des Ionenaustausches und ihre Verwendung für radiochemische Trennverfahren. Als Systeme werden wichtige Leitisotope, Uranspaltprodukte und Transurane näher besprochen.

Die Überführung radiochemischer Methoden in die Skala der „*Chemischen Kerntechnik*“ dürfte in Zukunft eine größere Anzahl spezialausgebildeter Chemiker erfordern und wird ebenfalls behandelt. Hierbei erfolgt als natürliche Überleitung von der Radiochemie die Besprechung der Kernbrennstoff-Aufbereitungsverfahren und der bei dem Aufbau und dem Betrieb von Kernreaktoren auftretenden chemischen Fragen.

Abschließend wird die zunehmende *Verwendung* der radioaktiven Atomarten in *Technik* und *Forschung* mit einigen Beispielen illustriert.

Nur am Rande behandelt wird die Strahlenchemie, die sich offenbar zu einem eigenen großen Arbeitsgebiet entwickelt.

Die Radiochemie hat bisher hauptsächlich zwei Aufgaben erfüllt: Einerseits hat sie entscheidende Beiträge zur Erforschung der Kernreaktionen geliefert, andererseits vielen Zweigen der Naturwissenschaft,

besonders der Chemie, wichtige neue Methoden gegeben, die bald zum festen Bestand der entsprechenden Forschungsrichtungen gehören werden.

Neue Aufgaben werden von der Kerntechnik gestellt. Grundlegende chemische Untersuchungen im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Gewinnung der Kernenergie stehen zur Zeit im Vordergrund radiochemischer Forschung. Bisher verwendete Verfahren sind oft nicht optimal; auch kleine Laboratorien können wichtige Beiträge zu ihrer Verbesserung geben.

#### *Zu Nomenklaturfragen:*

Die Bezeichnungen Kernchemie und Radiochemie werden häufig nebeneinander benutzt, wobei Bedeutungsinhalt und -umfang sowie die Grenzziehung gegenüber der Kernphysik Schwankungen unterworfen sind. Während in der Frühzeit der Radioaktivität nur der Ausdruck Radiochemie existierte, wurde vor etwa 30 Jahren die Bezeichnung Kernchemie eingeführt, um — in Analogie zur Kernphysik einerseits und zur konventionellen Chemie andererseits — das Gebiet der Reaktionen der Atomkerne zu kennzeichnen.

Der Ausdruck Kernchemie hat später an Boden gewonnen und wird von manchen Verfassern benutzt, um alle „chemischen Aspekte“ der Atomkernforschung zu bezeichnen. Kernchemie als Sammelbegriff hat sicher Vorteile praktischer Art, jedoch hat dies auch zu fragwürdigen Begleiterscheinungen geführt: Einerseits werden neuerdings Dinge, die mit Reaktionen des Atomkerns nichts mehr zu tun haben, in den Rahmenbegriff „Kernchemie“ einbezogen (wie z. B. Isotopentrennungen), andererseits ist auch versucht worden, den Begriff Radiochemie weiter einzuengen und nur auf die Anwendung radioaktiver Atomarten zur Lösung chemischer Probleme zu beziehen (eigentlich „angewandte Radiochemie“).

Die Entwicklung des Gesamtgebietes der Atomkernforschung führt in neuerer Zeit im angelsächsischen Schrifttum dazu, den Ausdruck Kernchemie nur für Untersuchungen von Kernreaktionen und insbesondere neuer Reaktionstypen zu benutzen. Infolgedessen mußte, um eine einigermaßen zutreffende Bezeichnung des Inhalts vorliegender Darstellung zu finden, der Titel: „Kern- und Radiochemie“ gewählt werden, ein sprachlich unschöner Kompromiß, zu dem auch seinerzeit FRIEDLANDER und KENNEDY bei der Benennung ihres amerikanischen Standardwerkes: „Nuclear and Radiochemistry“ gelangt sind.