

Gmelin Handbuch
der Anorganischen Chemie

Gmelin Handbuch der Anorganischen Chemie

Achte völlig neu bearbeitete Auflage
8th Edition

U Uran

Ergänzungsband A 2

Isotope

Mit 156 Figuren

BEARBEITER
(AUTHORS)

Wolfgang und Ursula Ehrfeld, Institut für Kernverfahrens-
technik, Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.W. Kirby, Mound Laboratory, Monsanto Research Corpo-
ration, Miamisburg, Ohio, USA
Helmut Münzel, Technische Hochschule Darmstadt und In-
stitut für Radiochemie, Kernforschungszentrum Karlsruhe
Ulrich Wenzel, Institut für Chemische Technologie, Kernfor-
schungsanlage Jülich

REDAKTION
(EDITORS)

Karl-Christian Buschbeck, Gmelin-Institut
Cornelius Keller, Verantwortlicher wissenschaftlicher
Koordinator der Ergänzungsbände über Uran
Schule für Kerntechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe

System-Nummer 55



Springer-Verlag
Berlin-Heidelberg-New York 1980

MITARBEITER (AUTHORS)

Kap. 1	H.W. Kirby	S. 1- 20
Kap. 2.1-2.3	U. Wenzel	S. 21- 57
Kap. 2.4	W. und U. Ehrfeld	S. 57-149
Kap. 2.5-2.6	U. Wenzel	S. 149-159
Kap. 3	H. Münzel	S. 160-336

DIE LITERATUR IST BIS MITTE 1978 AUSGEWERTET,
IN EINZELNEN FÄLLEN DARÜBER HINAUS

LITERATURE CLOSING DATE: MID 1978
IN SEVERAL CASES MORE RECENT DATA HAVE BEEN CONSIDERED

Die vierte bis siebente Auflage dieses Werkes erschien im Verlag von
Carl Winter's Universitätsbuchhandlung in Heidelberg

Library of Congress Catalog Card Number: Agr 25-1383

ISBN 3-540-93423-5 Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg · New York
ISBN 0-387-93423-5 Springer-Verlag, New York · Heidelberg · Berlin

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. im Gmelin Handbuch 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 dürfen.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Printed in Germany.—All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form—by photoprint, microfilm, or any other means—without written permission from the publishers.

© by Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg 1980

Gesamtherstellung Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg

Gmelin Handbuch der Anorganischen Chemie

Achte völlig neu bearbeitete Auflage

BEGRÜNDET VON

Leopold Gmelin

ACHTE AUFLAGE BEGONNEN

im Auftrage der Deutschen Chemischen Gesellschaft
von R.J. Meyer

FORTGEFÜHRT VON

E.H.E. Pietsch und A. Kotowski
Margot Becke-Goehring

HERAUSGEGEBEN VOM

Gmelin-Institut für Anorganische Chemie
der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissen-
schaften
Direktor: Ekkehard Fluck



Springer-Verlag
Berlin · Heidelberg · New York 1980

Gmelin Handbuch der Anorganischen Chemie

Achte, völlig neu bearbeitete Auflage
8th Edition

Gmelin Handbook Volumes on Radium and Actinides

Ac Actinium – 1942

Np, Pu...	Part A1, I°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 7a)	(Elements)	— 1973
	Part A1, II°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 7b)		— 1974
	Part A2°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 8)		— 1973
	Part B1°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 31)	(Metals)	— 1976
	Part B2	(New Suppl. Series Vol. Nr. 38)	(Alloys)	— 1976
	Part B3	(New Suppl. Series Vol. Nr. 39)		— 1977
	Part C°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 4)	(Compounds)	— 1972
	Part D1°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 20)	(Chemistry in Solution)	— 1975
	Part D2°	(New Suppl. Series Vol. Nr. 21)		— 1975
	Index* — 1979			

Pa	Protactinium Main Volume	– 1942
	Protactinium Suppl. Vol. 1°	(Element) – 1977
	Protactinium Suppl. Vol. 2°	(Metal. Alloys. Compounds. Chemistry in Solution) – 1977

Ra	Radium Main Volume	– 1928
	Radium Suppl. Vol. 1	(History. Cosmochemistry. Geochemistry) – 1977
	Radium Suppl. Vol. 2°	(Element. Compounds) – 1977

Th	Thorium Main Volume	– 1955
	Thorium Suppl. Vol. C1	(Compounds with Rare Gases, Hydrogen, Oxygen) – 1978
	Thorium Suppl. Vol. C2	(Ternary and Polynary Oxides) – 1976

U	Uranium Main Volume	– 1936
	Uranium Suppl. Vol. A1	(Uranium Deposits) – 1979
	Uranium Suppl. Vol. A2°	(Isotopes) – 1980 (present volume)
	Uranium Suppl. Vol. C1	(Compounds with Rare Gases and Hydrogen. Uranium-Oxygen System) – 1977
	Uranium Suppl. Vol. C2	(U ₃ O ₈ and UO ₃ Oxides. Hydroxides and Oxide Hydrates. Peroxides) – 1978
	Uranium Suppl. Vol. C3	(Ternary and Polynary Oxides) – 1975
	Uranium Suppl. Vol. C8	(Compounds with Fluorine) – 1980
	Uranium Suppl. Vol. C9*	(Compounds with Chlorine, Bromine, Iodine) – 1979
	Uranium Suppl. Vol. E1*	(Coordination Compounds) – 1979
	Uranium Suppl. Vol. E2°	(Coordination Compounds) – 1980

* Completely or ° in part in English

Gmelin-Institut für Anorganische Chemie
der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften

KURATORIUM (ADVISORY BOARD)

Dr. J. Schaafhausen, Vorsitzender (Hoechst AG, Frankfurt/Main-Höchst), Dr. G. Breil (Ruhrchemie AG, Oberhausen-Holten), Dr. G. Broja (Bayer AG, Leverkusen), Prof. Dr. G. Fritz (Universität Karlsruhe), Prof. Dr. N.N. Greenwood (University of Leeds), Prof. Dr. R. Hoppe (Universität Gießen), Prof. Dr. R. Lüst (Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, München), Dr. H. Moell (BASF-Aktiengesellschaft, Ludwigshafen), Prof. Dr. E.L. Muetterties (University of California, Berkeley, California), Prof. Dr. H. Nöth (Universität München), Prof. Dr. A. Rabenau (Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart), Prof. Dr. Dr. h.c. mult. G. Wilke (Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim/Ruhr)

DIREKTOR

Prof. Dr. Dr. h.c. Ekkehard Fluck

STELLVERTRETENDER DIREKTOR

Dr. W. Lippert

HAUPTREDAKTEURE (EDITORS IN CHIEF)

Dr. K.-C. Buschbeck, Ständiger Hauptredakteur

Dr. H. Bergmann, Dr. H. Bitterer, Dr. H. Katscher, Dr. R. Keim, Dipl.-Ing. G. Kirschstein, Dipl.-Phys. D. Koschel, Dr. U. Krüerke, Dr. H.K. Kugler, Dr. E. Schleitzer-Rust, Dr. A. Slawisch, Dr. K. Swars, Dr. R. Warncke

MITARBEITER (STAFF)

Z. Amerl, D. Barthel, Dr. N. Baumann, I. Baumhauer, Dr. K. Beeker, Dr. W. Behrendt, Dr. L. Berg, Dipl.-Chem. E. Best, M. Brandes, E. Brettschneider, E. Cloos, Dipl.-Phys. G. Czack, I. Deim, L. Demmel, Dipl.-Chem. H. Demmer, R. Dombrowsky, R. Dowideit, Dipl.-Chem. A. Drechsler, Dipl.-Chem. M. Drößmar, I. Eifler, M. Engels, Dr. H.-J. Fachmann, I. Fischer, Dr. R. Froböse, J. Füßel, Dipl.-Ing. N. Gagel, Dipl.-Chem. H. Gedschold, E. Gerhardt, Dr. U.W. Gerwarth, M.-L. Gerwien, Dipl.-Phys. D. Gras, Dr. V. Haase, H. Hartwig, B. Heibel, Dipl.-Min. H. Hein, G. Heinrich-Sterzel, A. Heise, H.-P. Hente, H.W. Herold, U. Hettwer, Dr. I. Hinz, Dr. W. Hoffmann, Dipl.-Chem. K. Holzapfel, Dipl.-Chem. W. Karl, H.-G. Karrenberg, Dipl.-Phys. H. Keller-Rudek, Dipl.-Phys. E. Koch, Dr. E. Koch, Dipl.-Chem. K. Koeber, Dipl.-Chem. H. Köttelwesch, R. Kolb, E. Kranz, Dipl.-Chem. I. Kreuzbichler, Dr. A. Kubny, Dr. P. Kuhn, M. Langer, M.-L. Lenz, Dr. A. Leonard, Dipl.-Chem. H. List, H. Mathis, K. Mayer, E. Meinhard, Dr. P. Merlet, K. Meyer, M. Michel, K. Nöring, C. Pielenz, E. Preißer, I. Rangnow, Dipl.-Phys. H.-J. Richter-Ditten, Dipl.-Chem. H. Rieger, E. Rieth, E. Rudolph, G. Rudolph, Dipl.-Chem. S. Ruprecht, Dipl.-Chem. D. Schneider, Dr. F. Schröder, Dipl.-Min. P. Schubert, Dipl.-Ing. H.M. Somer, E. Sommer, Dr. P. Stieß, M. Teichmann, Dr. W. Töpfer, U. Trautwein, Dr. B. v. Tschirschnitz-Geibler, Dipl.-Ing. H. Vanecek, Dipl.-Chem. P. Velić, Dipl.-Ing. U. Vetter, Dipl.-Phys. J. Wagner, R. Wagner, Dipl.-Chem. S. Waschk, Dr. G. Weinberger, Dr. H. Wendt, H. Wiegand, K. Wolff, Dr. A. Zelle, U. Ziegler

FREIE MITARBEITER (CORRESPONDENT MEMBERS OF THE SCIENTIFIC STAFF)

Dr. I. Kubach, Dr. J.F. Rounsaville, Dr. K. Rumpf, Dr. R.P. Taylor, Dr. U. Trobisch

EM. WISSENSCHAFTLICHES MITGLIED

(EMERITUS MEMBER OF THE INSTITUTE)

Prof. Dr. Dr. E.h. Margot Becke

AUSWÄRTIGE WISSENSCHAFTLICHE MITGLIEDER

(CORRESPONDENT MEMBERS OF THE INSTITUTE)

Prof. Dr. Hans Bock

Prof. Dr. Dr. Alois Haas, Sc. D. (Cantab.)

Preface

This volume "Uran" Erg.-Bd. A2 of the Gmelin Handbook covers the history of uranium, the preparation of its technologically important isotopes, and the nuclear properties of all its isotopes.

The history of uranium, as we look back from our present-day point of view, is a fascinating story. The development of our knowledge of this element may be said to have changed the world. Thus, interest in the history of uranium extends well beyond the specialized fields of chemistry, physics, and nuclear engineering.

The sections on isotope preparation are weighted according to the technological importance of the individual isotopes. Foremost in importance is ^{235}U . Current commercial enrichment procedures — diffusion, ultra centrifuge, and the nozzle process — are covered. Alternative procedures which may be used in the future — laser enrichment and chemical isotope separation — are placed in perspective.

An immense amount of work has been done on the properties of uranium isotopes. To save space and to allow more meaningful presentation, the tables and diagrams give "accepted" or "best" data.

The literature is covered to the middle of 1978. In some cases, more recent publications have also been considered. Since the number of publications pertinent to the "Enrichment of ^{235}U :" and the "Isotopes of Uranium" chapters runs well into the tens of thousands, we have emphasized the more recent work.

I wish to thank the authors of the various chapters for their collaboration. Included in my thanks are the Gmelin Institute and especially Dr. Buschbeck, who was responsible for editing this volume, and Professor Fluck, Director of the Gmelin Institute. Their cooperation could not have been better. Finally, my thanks to the Literature Department of the Karlsruhe Nuclear Research Center for their invaluable help in digging out hard-to-find publications and assembling the literature.

Karlsruhe, May 1980

Cornelius Keller

Vorwort

Der vorliegende Band „Uran“ Erg.-Bd. A2 des Gmelin Handbuchs behandelt die Geschichte des Urans, die Gewinnung der technisch interessanten Isotope und die Kerneigenschaften der Isotope.

Die Geschichte des Urans wird hier von einem modernen Standpunkt aus betrachtet. Die Entwicklung der Kenntnis dieses die Welt verändernden Elements ist nicht nur für den Wissenschaftler aus Chemie, Physik oder technischem Bereich von hohem Interesse.

Die Abschnitte zur Gewinnung der technisch wichtigen Isotope tragen der Bedeutung der einzelnen Isotope Rechnung. Im Vordergrund steht hier die Anreicherung von ^{235}U , wobei nicht nur die gegenwärtig praktizierten Verfahren der Diffusion, der Ultrazentrifuge und der Trenndüse behandelt, sondern auch die Aspekte alternativer zukünftiger Verfahren (Laseranreicherung, chemische Isotopentrennung etc.) in den richtigen Blickpunkt gerückt werden.

Über die Kerneigenschaften der U-Isotope liegen umfangreiche Untersuchungen vor. Aus räumlichen und didaktischen Gründen wurde einer knappen Darstellung der „akzeptierten“ oder „besten“ Daten in Diagrammen und Tabellen der Vorzug gegeben.

Die Literatur wurde bis Mitte 1978 berücksichtigt; in einigen Fällen wurden auch noch neuere Literaturstellen aufgenommen. Bei der kritischen Auswahl der weit in die Zehntausende gehenden Zahl der publizierten Arbeiten für die Kapitel „Anreicherung von ^{235}U “ und „Isotope des Urans“ wurden besonders die modernen Ergebnisse berücksichtigt.

Den Autoren der einzelnen Beiträge danke ich für die gute Zusammenarbeit; ein Dank, in den auch das Gmelin-Institut — und hier speziell Dr. Buschbeck als verantwortlicher Redakteur sowie Herr Prof. Dr. Fluck als Direktor — eingeschlossen wird. Eine bessere Kooperation ist kaum möglich. Dank gilt auch der Literaturabteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe für ihre unersetzliche Hilfe bei der z.T. extrem schwierigen Literaturbeschaffung.

Karlsruhe, Mai 1980

Cornelius Keller

Table of Contents

(Inhaltsverzeichnis s. S. V)

	Page
1 History	1
1.1 Introduction	1
1.2 Discovery and Naming of Uranium	2
1.3 Isolation of Uranium Metal	3
1.4 Uranium and the Periodic Law	3
1.5 Discovery of Radioactivity	4
1.6 The Decay Products of Uranium	5
1.7 The Natural Isotopes of Uranium	7
1.8 Artificial Radioactivity	7
1.9 Discovery of Uranium-239	9
1.10 Discovery of Nuclear Fission	10
1.11 Chain Reactions	12
1.12 The First Nuclear Reactor	13
1.13 Isotope Separation	15
1.14 The Atomic Bomb and the Enhanced Uranium Exploration	15
1.15 Nuclear Power	16
2 Production of Important Uranium Isotopes	21
2.1 Production of ^{232}U	21
2.1.1 Formation of ^{232}U	21
Formation from ^{231}Pa	22
Formation from ^{230}Th	25
Formation from ^{232}Th	29
2.1.2 Production of ^{232}U from ^{230}Th	31
Isolation of ^{230}Th	31
Reprocessing of Irradiated ^{230}Th Samples	33
Separation of ^{232}U from Irradiated ^{231}Pa	33
2.1.3 Other Methods of Preparing ^{232}U	34
2.2 Recovery of ^{233}U	37
2.2.1 Formation of ^{233}U in Nuclear Reactions	38
2.2.2 The Use of Th in Nuclear Reactors	41
2.2.3 Separation of ^{233}U	45
Extraction Methods	46
Chromatographic Methods	47
Precipitation Methods	49
Fluoride Vaporization	50

	Page
2.3 Recovery of ^{234}U	52
2.3.1 Production by Isotope Separation	53
2.3.2 Production from Natural Uranium by Separation from ^{234}Th	53
2.3.3 Recovery from ^{238}Pu	53
2.3.4 Production from ^{233}U	56
2.4 Enrichment of ^{235}U	57
2.4.1 Introduction	57
2.4.2 Fundamental Concepts in Uranium Isotope Separation	60
Separation Element	60
Cascade	62
Separative Capacity and Separative Work	68
Specification of a Separation Task in Terms of Material Flow	68
Value Balance around a Separation Element	70
Separative Capacity and Thermodynamic Work of Separation	72
Specific Expenditure	73
2.4.3 Gaseous Diffusion Process	74
Synopsis of Process Development	74
Ideal Enrichment Factor	75
Stage Separation Factor	76
Principle and Arrangement of Separation Stages	76
Barrier Efficiency	77
Aerodynamic (Mixing) Efficiency	79
Stage Efficiency	80
Specific Expenditure	81
Gaseous Diffusion Technology	83
Barriers	83
Design of the Separation Stages	84
Gaseous Diffusion Cascades	88
2.4.4 Gas Centrifuge Process	90
Synopsis of Process Development	90
Equilibrium Separation in a Centrifugal Field	91
Maximum Separative Capacity	92
Countercurrent Centrifuge	93
Advantages of Countercurrent Operation	93
Generation of the Countercurrent	95
Influence of Circulation Rate on Separative Capacity and Separation Factor	97
Separative Efficiency	98
Gas Centrifuge Technology	99
Design of the Zippe Centrifuge	99
Rotor Materials	100
Subcritical and Supercritical Centrifuges	101
Commercial Enrichment Plants	102
2.4.5 Separation Nozzle Process	104
Synopsis of Process Development	104
Basic Principle of Isotope Separation in the Separation Nozzle	104
Diffusion and Flow Phenomena in the Separation Nozzle	106
Equilibrium Separation	106
Development of Uranium Isotope Separation in the Auxiliary Gas	107
Properties of Separation Nozzle Flow	109

	Page
Approaches for Further Developing the Separation Nozzle Process	110
Double Deflecting System	111
Systems with Dynamic Flow Deflection	111
Specific Expenditure	113
Separation Nozzle Technology	114
Commercial Separation Nozzle Elements	114
Design of Separation Stages	116
Separation Nozzle Cascades	116
2.4.6 UCOR Process	118
Synopsis of Process Development	118
Operating Conditions and Performance Data	120
Helikon Technique	121
Principle of Cascade	121
Design of Commercial Helikon Modules	123
2.4.7 Chemical Exchange Processes	125
Synopsis of Process Development	125
Elementary Separation Effect of Chemical Exchange Processes	125
Technological Aspects of Chemical Isotope Exchange Processes	128
Multiplication of the Elementary Effect Isotope Separation	128
Equilibrium Time of the Enrichment Plant	130
Exchange Processes	131
Gaseous and Liquid Phase	131
Gaseous and Solid Phase	132
Nonmixing Liquid Phases	132
Redox Ion Exchange	133
Performance Data of the French Isotope Exchange Process	134
2.4.8 Photosensitive Separation of Isotopes by Laser Radiation	134
Principle and Development Status	134
Selective Ionization of Atomic Uranium	135
Principle of Separation Method	135
Generation of a Beam of Atomic Uranium	136
Selective Excitation of an Isotopic Species	136
Ionization of the Excited Atoms	137
Separation of Ions and Neutral Particles	138
Separation Experiments	138
Selective Dissociation of Uranium Compounds	139
Principle of Separation Method	139
Selective Excitation of UF_6 Molecular Vibrations	141
Dissociation of the Excited UF_6 Molecules	142
Lasers for Selective Excitation and Dissociation of UF_6	143
Selective Dissociation of Other Uranium Compounds	143
2.4.9 Concluding Remarks	144
2.5 Formation of ^{236}U	149
2.5.1 Formation of ^{236}U in the Reactor	149
2.5.2 Separation of ^{236}U	151
2.5.3 Enrichment of ^{236}U	151
2.6 Recovery of ^{237}U	153

	Page
3 Properties of Uranium Isotopes	160
3.1 Structure and Decay	160
3.1.1 Decay Chains	166
3.1.2 Decay Data and Level Schemes	167
Uranium-226	168
Uranium-227	169
Uranium-228	169
Uranium-229	170
Uranium-230	171
Uranium-231	174
Uranium-232	177
Uranium-233	181
Uranium-234	191
Uranium-235g	197
Uranium-235 m	206
Uranium-236	208
Uranium-236, Spontaneous Fission Isomer	211
Uranium-237	211
Uranium-238	219
Uranium-238, Spontaneous Fission Isomer	222
Uranium-239	222
Uranium-240	227
3.2 Fission	243
3.2.1 Fission Barrier	243
3.2.2 Spontaneous Fission	248
3.2.3 Cross Sections and Yields	254
3.2.4 Prompt Neutron Emission	302
3.2.5 Delayed Neutrons	306
Decay Series of U Isotopes	325
Table of Conversion Factors	337

Inhaltsverzeichnis

(Table of Contents see Page I)

	Seite
1 Geschichte	1
1.1 Einführung	1
1.2 Entdeckung und Benennung des Urans	2
1.3 Isolierung von Uranmetall	3
1.4 Uran im Periodensystem	3
1.5 Entdeckung der Radioaktivität	4
1.6 Die Zerfallsprodukte des Urans	5
1.7 Die natürlichen Uranisotope	7
1.8 Künstliche Radioaktivität	7
1.9 Entdeckung von ^{239}U	9
1.10 Entdeckung der Kernspaltung	10
1.11 Kettenreaktionen	12
1.12 Der erste Kernreaktor	13
1.13 Isotopentrennung	15
1.14 Die Atombombe und die verstärkte Erforschung des Urans	15
1.15 Kernkraft	16
2 Herstellung wichtiger Uranisotope	21
2.1 Gewinnung von ^{232}U	21
2.1.1 Bildung von ^{232}U	21
Bildung aus ^{231}Pa	22
Bildung aus ^{230}Th	25
Bildung aus ^{232}Th	29
2.1.2 Produktion von ^{232}U aus ^{230}Th	31
Isolierung des ^{230}Th	31
Wiederaufarbeitung bestrahlter ^{230}Th -Proben	33
Abtrennung des ^{232}U vom bestrahlten ^{231}Pa	33
2.1.3 Andere Darstellungsverfahren für ^{232}U	34
2.2 Gewinnung von ^{233}U	37
2.2.1 Bildung von ^{233}U durch Kernreaktionen	38
2.2.2 Der Einsatz von Th in Kernreaktoren	41
2.2.3 Abtrennung von ^{233}U	45
Extraktionsmethoden	46
Chromatographische Verfahren	47
Fällungsverfahren	49
Fluoridverflüchtigung	50

	Seite
2.3 Gewinnung von ^{234}U	52
2.3.1 Erzeugung durch Isotopentrennung	53
2.3.2 Erzeugung aus Natururan durch chemische Abtrennung von ^{234}Th	53
2.3.3 Gewinnung aus ^{238}Pu	53
2.3.4 Erzeugung aus ^{233}U	56
2.4 Anreicherung von ^{235}U	57
2.4.1 Einleitung	57
2.4.2 Allgemeine Grundlagen der Uranisotopentrennung	60
Trennelement	60
Kaskade	62
Werterzeugung und Trennarbeit	68
Bewertung einer Trennaufgabe anhand der Materialströme	68
Wertstrombilanz am Trennelement	70
Zusammenhang zwischen Trennleistung und thermodynamischer Entmischungsarbeit	72
Spezifische Aufwandsgrößen	73
2.4.3 Gasdiffusionsverfahren	74
Übersicht über die Verfahrensentwicklung	74
Idealer Anreicherungsfaktor	75
Realer Anreicherungsfaktor der Trennstufe	76
Prinzip und Schaltung der Trennstufen	76
Membranwirkungsgrad	77
Aerodynamischer Wirkungsgrad	79
Stufenwirkungsgrad	80
Spezifische Aufwandsgrößen	81
Technologie des Gasdiffusionsverfahrens	83
Diffusionsmembranen	83
Aufbau der Trennstufen	84
Gasdiffusionskaskaden	88
2.4.4 Gaszentrifugenverfahren	90
Übersicht über die Verfahrensentwicklung	90
Gleichgewichtsentmischung im Zentrifugalfeld	91
Maximale Trennleistung der Zentrifuge	92
Gegenstrom-Zentrifuge	93
Vorteile des Gegenstrom-Prinzips	93
Anregung des Gegenstroms	95
Einfluß der Stärke des Gegenstroms auf Trennleistung und Trennfaktor	97
Trennleistungs-Wirkungsgrad	98
Technologie des Zentrifugenverfahrens	99
Aufbau der Zippe-Zentrifuge	99
Rotormaterialien	100
Unterkritische und überkritische Zentrifugen	101
Technische Anreicherungsanlagen	102
2.4.5 Trenndüsenverfahren	104
Übersicht über die Verfahrensentwicklung	104
Grundprinzip der Isotopenentmischung in der Trenndüse	104
Diffusions- und Strömungsvorgänge in der Trenndüse	106
Gleichgewichtsentmischung	106

	Seite
Ablauf der Uranisotopenentmischung im Zusatzgas	107
Eigenschaften der Trenndüsenströmung	109
Ansätze zur Weiterentwicklung des Trenndüsenverfahrens	110
Doppelumlenkssystem	111
Systeme mit dynamischer Strahlumlenkung	111
Spezifische Aufwandsgrößen	113
Technologie des Trenndüsenverfahrens	114
Technische Trenndüsenelemente	114
Aufbau der Trennstufen	116
Trenndüsenkaskaden	116
2.4.6 UCOR-Verfahren	118
Übersicht über die Verfahrensentwicklung	118
Betriebsbedingungen und Leistungsdaten	120
Helikon-Technik	121
Prinzip der Kaskadierung	121
Aufbau technischer Helikon-Module	123
2.4.7 Chemische Austauschverfahren	125
Übersicht über die Verfahrensentwicklung	125
Elementarer Trenneffekt der chemischen Austauschreaktion	125
Technologische Aspekte chemischer Isotopenaustauschverfahren	128
Vervielfachung des Elementareffektes der Isotopentrennung	128
Einstellzeit der Anreicherungsanlage	130
Austauschprozesse	131
Gasförmige und flüssige Phase	131
Gasförmige und feste Phase	132
Nichtmischbare flüssige Phasen	132
Redox-Ionenaustausch	133
Leistungsdaten des französischen Isotopenaustauschprozesses	134
2.4.8 Photoselektive Isotopentrennung durch Laserstrahlung	134
Grundprinzip und bisherige Entwicklung	134
Selektive Ionisation von atomarem Uran	135
Prinzip der Trennmethode	135
Erzeugung eines Uran-Atomstrahls	136
Selektive Anregung einer Isotopensorte	136
Ionisierung der angeregten Atome	137
Trennung von Ionen und Neutralteilchen	138
Trennversuche	138
Selektive Dissoziation von Uranverbindungen	139
Prinzip der Trennmethode	139
Selektive Anregung der Molekülschwingungen von UF_6	141
Dissoziation der angeregten UF_6 -Moleküle	142
Laser zur selektiven Anregung und Dissoziation von UF_6	143
Selektive Dissoziation anderer Uranverbindungen	143
2.4.9 Schlußbemerkungen	144
2.5 Bildung von ^{236}U	149
2.5.1 Bildung von ^{236}U im Reaktor	149
2.5.2 Abtrennung von ^{236}U	151
2.5.3 Anreicherung von ^{236}U	151
2.6 Gewinnung von ^{237}U	153

	Seite
3 Eigenschaften der Uranisotope	160
3.1 Struktur und Zerfall	160
3.1.1 Zerfallsreihen	166
3.1.2 Zerfallsdaten und Niveauschemata	167
^{226}U	168
^{227}U	169
^{228}U	169
^{229}U	170
^{230}U	171
^{231}U	174
^{232}U	177
^{233}U	181
^{234}U	191
^{235g}U	197
^{235m}U	206
^{236}U	208
^{236}U , Spontaneous Fission Isomer	211
^{237}U	211
^{238}U	219
^{238}U , Spontaneous Fission Isomer	222
^{239}U	222
^{240}U	227
3.2 Kernspaltung	243
3.2.1 Spaltungsschwelle	243
3.2.2 Spontaner Zerfall	248
3.2.3 Wirkungsquerschnitte und Ausbeuten	254
3.2.4 Emission prompter Neutronen	302
3.2.5 Gebremste Neutronen	306
Zerfallsreihen der U-Isotope	325
Umrechnungstabellen	337