

Gmelin Handbuch
der Anorganischen Chemie

Gmelin Handbuch der Anorganischen Chemie

Achte völlig neu bearbeitete Auflage

8th Edition

U Uran

Ergänzungsband A3

Technologie. Verwendung

Mit 82 Figuren

BEARBEITER
(AUTHORS)

Helmut Assmann, Kraftwerk Union AG, Erlangen
Wilfried Flöter, Uranerzbergbau GmbH, Bonn
Karl-Heinz Hellberg, Kali-Chemie, Hannover
Friedrich Plöger, Reaktor-Brennelement Union GmbH,
Hanau-Wolfgang
Helmut Schneider, Kali-Chemie, Hannover
Heinz Stehle, Kraftwerk Union AG, Erlangen
Leonhard Taumann, Lafayette, California, USA
Horst Vietzke, Nukem GmbH, Hanau-Wolfgang

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 1981

MITARBEITER (AUTHORS)

Kap. 1	W. Flöter	S. 1/89
Kap. 2.1	F. Plöger	S. 90/119
Kap. 2.2	H. Vietzke	S. 120/1
Kap. 2.3	K.-H. Hellberg, H. Schneider	S. 121/41
Kap. 2.4	H. Vietzke	S. 141/51
Kap. 3	H. Assmann, H. Stehle	S. 152/258
Kap. 4.1	F. Plöger	S. 259/65
Kap. 4.2 bis 4.4	H. Vietzke	S. 265/79
Kap. 5	L. Taumann	S. 280/95

DIE LITERATUR IST BIS MITTE 1979 AUSGEWERTET,
IN EINZELNEN FÄLLEN DARÜBER HINAUS

LITERATURE CLOSING DATE: MID 1979
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 3-540-93429-4 Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg · New York

ISBN 0-387-93429-4 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 dürften.

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

Wiesbadener Graphische Betriebe GmbH, Wiesbaden

Preface

The present Volume A3 "Uranium" of the Gmelin Handbuch deals with the technology of uranium from its extraction from uranium ores to the manufacture of uranium-containing nuclear fuels and their use in various kinds of nuclear reactors. The behavior of and changes in nuclear fuels during nuclear reactor operation are the subject of Volume A4.

Today, uranium is extracted in mining when its concentration in the ore amounts to at least 0.03% U_3O_8 . The specific processing methods depend on the nature of the deposits. Alkaline and especially acid leaching are prominent at this time; newer processes such as in-situ or bacterial leaching are under development. The path of uranium from the ore through extraction and purification to the saleable product is described in detail for the different processes, as well as the methods and prospects for the future winning of uranium from phosphate ores and through sea water technology, that are now only at their beginning.

The technical production of important compounds embraces in particular UF_6 for isotope separation and UO_2 as a nuclear fuel for modern light water reactors. In view of their limited metallurgical qualities for use as nuclear fuels, uranium metal and uranium alloys possess only minor application possibilities, while with respect to uranium carbide and uranium nitride as nuclear fuels of the future, enough experience in their technical manufacture and irradiation behavior has not yet been accumulated.

The utilization of uranium is for practical purposes limited to its application as a nuclear fuel alone. It has a slight importance also as a shielding material for γ -rays, but all other application possibilities are practically excluded by the legislator through radiation protection regulation, because of the radioactivity of uranium.

In the use of uranium, to be sure, the multiplicity of charge forms for uranium as a nuclear fuel is remarkable. Apart from the modern power reactors, the majority of educational, production, and research reactors have their own "unique" nuclear fuels, be they aqueous nuclear fuel solutions, dispersions, or complex ceramic systems.

I thank the authors from various fields of industry for their excellent collaboration; thanks also to those of the Gmelin Institute with Dr. Buschbeck as the supervising editor and Prof. Dr. Fluck as Director.

Karlsruhe
November 1980

Cornelius Keller

Vorwort

Der vorliegende Band „Uran“ Erg.-Band A3 des Gmelin-Handbuchs behandelt die Technologie des Urans von seiner Gewinnung aus Uranerzen bis zur Herstellung von U-haltigen Kernbrennstoffen und deren Einsatz in den verschiedenen Kernreakortypen. Das Verhalten und die Veränderungen des Kernbrennstoffs während des Kernreaktorbetriebs sind Gegenstand des Bandes A4.

Uran wird heute bergmännisch gewonnen, wenn seine Konzentration in Erzen mindestens 0.03% U_3O_8 beträgt, wobei die spezielle Aufarbeitungsmethode von der Art der Lagerstätte abhängt. Derzeit stehen die alkalische und besonders die saure Laugung im Vordergrund, neuere Verfahren, wie in-situ- oder bakterielle Laugung, sind in der Entwicklung. Der Weg des Urans vom Erz über die Laugung und Reinigung bis zum verkaufsfähigen Produkt wird für die verschiedenen Verfahren detailliert beschrieben, ebenso die Methoden und Aussichten einer zukünftigen Gewinnung von Uran aus Phosphaterzen und aus Meerwasser, die erst am Anfang stehen.

Die technische Darstellung wichtiger Verbindungen umfaßt im besonderen UF_6 für die Isotopentrennung und UO_2 als Kernbrennstoff für die modernen Leichtwasserreaktoren. Wegen ihrer nur mäßigen metallurgischen Eigenschaften beim Einsatz als Kernbrennstoffe besitzen U-Metall und U-Legierungen nur geringe Anwendungsmöglichkeiten, während über U-Carbid und U-Nitrid als Kernbrennstoffe der Zukunft noch nicht genügend Erfahrungen in der technischen Herstellung und im Bestrahlungsverhalten gemacht worden sind.

Die Verwendung von Uran ist praktisch allein auf die Verwendung als Kernbrennstoff beschränkt. Eine geringe Bedeutung besitzt es noch als Abschirmmaterial für γ -Strahlen, während alle anderen Anwendungsmöglichkeiten wegen der Radioaktivität des Urans vom Gesetzgeber durch die Strahlenschutzverordnung praktisch ausgeschlossen sind.

Bei der Verwendung des Urans ist allerdings die Vielzahl der Einsatzformen des Urans als Kernbrennstoff bemerkenswert. Von den modernen Leistungsreaktoren abgesehen, hat die Mehrzahl der Unterrichts-, Produktions- und Forschungsreaktoren ihren „eigenen“ Kernbrennstoff, seien es wäßrige Kernbrennstofflösungen, Dispersions- oder kombinierte keramische Systeme.

Den Autoren aus verschiedenen Bereichen der Industrie danke ich für die gute Zusammenarbeit; ein Dank, in den auch das Gmelin-Institut mit Dr. Buschbeck als verantwortlichem Redakteur und Prof. Dr. Fluck als Direktor eingeschlossen ist.

Karlsruhe
November 1980

Cornelius Keller

Table of Contents

(Inhaltsverzeichnis s. S. XI)

	Page
1 Milling of Uranium Ores and Preparation of a Commercial Concentrate	1
1.1 Types of Uranium Ores and Their Economic Potential	1
1.2 Quality Requirements for Commercial Yellow Cake	3
1.3 Some General Principles in Milling Uranium Ores	5
1.4 Alternatives in Standard Uranium Milling Processes	5
1.4.1 The Hydrometallurgical Processes	7
Leaching the Ores with Acid	7
Alkali-Leaching of the Ores	9
1.4.2 Procedures in Milling Uranium Ores	11
Crushing the Ore	11
Sorting Run-of-the-Mine Ore	12
Grinding and Classifying the Ores	14
Preconditioning the Ores for Leaching	15
Leaching the Uranium Ores	17
Leaching at Atmospheric-Pressure	18
High Pressure Leaching	19
Modern Leaching Processes	21
Strong Acid Leaching	21
Heap Leaching	23
Bacterial Leaching	26
In situ Leaching	27
Extraction of Uranium from Phosphates	29
Solid-Liquid Separation prior to Extraction of Uranium	34
Flocculation of Pulps	35
Vacuum Filtration	36
Decantation	38
Cycloning	40
Centrifuging	41
Clarification of Leach Solution	42
Uranium Extraction by Ion Exchange	42
General	42
Solid Ion Exchange	43
Ion Exchange Resins	43
Reactions in Ion Exchange	44
Poisoning and Coating of Resins	44
Physical Properties of Resins	46
Loading	46
Elution	47
Ion Exchange Processes	47
Fixed Bed Process	47
Resin-in-Pulp Process	48

	Page
Continuous Ion Exchange	48
Comparison of Continuous Ion Exchange Systems	49
Areas and Chances for Ion Exchange Processes	51
Solvent Extraction	52
General	52
Extraction	53
Organic Phase	53
Mixing	56
Settling	57
Stripping	57
Losses of Extractants and Stripping Agents	58
Interferences in Solvent Extraction and Removal of Sludge	59
Solvent-in-Pulp	59
Equipment	60
ELUEX Process	62
Comparison of Solid Ion Exchange and Solvent Extraction	62
Unconventional Processes	63
Production of Saleable Uranium	63
Criteria	63
Final Solutions for Precipitation of Uranium	64
Methods for Precipitation	64
General	64
Precipitation from Alkaline Solutions	65
Caustic Precipitation	65
Precipitation using Neutralization	66
Precipitation using Hydrogen Reduction	66
Alternative Precipitations from Alkaline Solutions	66
Precipitation from Acid Solutions	67
Precipitation using Neutralization	67
Peroxide Precipitation	68
Equipment for Uranium Precipitation	68
Product Dewatering, Drying, and Packaging	69
Dewatering, Thickening	69
Drying	69
Packaging	70
1.5 Uranium Mill Tailings	70
1.5.1 Tailings, Pond	70
1.5.2 Gaseous Effluents	72
1.6 Process Control	72
1.6.1 General	72
1.6.2 Chemical Laboratory	72
1.6.3 Metallurgical Laboratory	73
1.6.4 Radiation Protection	73

	Page
1.7 Uranium from Seawater	75
1.7.1 Uranium Reserves in Seawater	75
1.7.2 Chemical Bonding of Uranium in Seawater	76
1.7.3 Basical Methods for Extraction of Uranium	77
1.7.4 Status of Technology	77
1.7.5 Preferred Locations in Oceans	80
1.8 Production Costs for Uranium	80
1.9 Sales Price	81
2 Industrial Production of Important Compounds	90
Review in English	90
2.1 Uranium Dioxide	90
General Literature	90
2.1.1 Introduction	90
2.1.2 Raw Materials. Purification	91
2.1.3 Concentration of Uranyl Nitrate Solution and Denitration by Thermal Decomposition	94
Production Process	95
Evaporative Concentration	95
Denitration	95
Continuous Denitration	96
2.1.4 Precipitation of Uranium from Uranyl Salt Solutions	99
The Ammonium Diuranate (ADU) Process	99
The Ammonium Uranyl Carbonate (AUC) Process	101
2.1.5 Reduction to UO_2 Powder	103
Handling of the NH_4NO_3 Filtrates	104
2.1.6 Dry Chemistry Processes	104
Comparison of the Processes	113
2.1.7 Design Safety Concepts	115
Safety with Respect to Criticality	116
Geometrically Safe Individual Containers	116
Apparatus with Heterogeneous Poisoning	116
Neutron Interaction Effects in UO_2 Fabrication Design	117
Radiation Protection	117
Fissionable Material Control	118

	Page
2.2 Uranium Carbides and Nitrides	120
2.2.1 Uranium Carbides UC , U_2C_3 , UC_2	120
2.2.2 Uranium Nitrides UN and U_2N_3	120
2.3 Uranium Hexafluoride	121
2.3.1 Introduction	121
2.3.2 Production of UF_4	122
Dry Processes	122
Hydrofluorination of UO_2	122
Hydrofluorination in Fluid Bed Reactors	125
Hydrofluorination in Moving Bed Reactors (LC type)	125
Hydrofluorination in Screw Reactors	125
Thermal Decomposition of NH_4UF_5	126
Fluorination of UO_3 with Dichlorodifluoromethane	127
Wet Processes	127
2.3.3 Production of UF_6	127
UF_6 from UF_4 by Reaction with Elementary F_2	127
Conversion in Flame Reactors	128
Conversion in Fluid Bed Reactors	129
Separation of Uranium Hexafluoride from the Reaction Gas	130
Purification of Uranium Hexafluoride by Distillation	130
Processing of Production Residues	131
UF_6 by Reaction of UF_4 with Oxygen (Fluorox Process)	131
UF_6 by Fluorination of Uranium Compounds with Halogen Fluorides	133
UF_6 by Conversion of Uranium Oxides with Fluorine	134
UF_6 Production by Other Processes	135
2.3.4 Practically Employed Process Versions	136
Process of the Allied Chemical Corp., Metropolis, Illinois	136
British Process (Springfields)	137
Kerr-McGee Process (Sequoyah, Oklahoma)	137
Canadian Process (Eldorado Nuclear Ltd., Port Hope, Ontario)	138
French Process (Le Bouchet, Malvesi/Pierrelatte)	138
USAEC Process (Weldon Springs, Missouri; Fernald, Ohio; Paducah, Kentucky)	138
2.4 Uranium Metal	141
2.4.1 Generalities	141
2.4.2 Preparation of UF_4 from UO_2	142
2.4.3 Preparation of UF_4 from UF_6	143
Reaction with Hydrogen	144
Reaction with Chlorinated Hydrocarbons	146

	Page
2.4.4 Reduction with Magnesium	147
2.4.5 Reduction with Calcium.	149
2.4.6 Reduction of Uranium Oxides	150
3 Use of Uranium as Nuclear Fuel	152
General References	152
Introduction and Survey	154
Importance of Uranium and Uranium-containing Materials as Nuclear Fuels	154
Ideal Properties of Nuclear Fuels	154
Classification of Nuclear Fuels	155
3.1 Uranium Metal and Uranium Alloys	157
Review in English	157
General References	157
3.1.1 Unalloyed Uranium Metal	158
3.1.2 Uranium Alloys.	162
Alloys of α -Uranium.	162
Alloys of γ -Uranium.	163
Intermetallic Compounds.	163
Uranium-Aluminium	163
Uranium-Silicon	164
3.1.3 Other Metallic Nuclear Fuels.	166
3.2 Oxide Nuclear Fuels	169
Review in English	169
General References	170
3.2.1 Uranium Dioxide	171
Historical Notes on the Use of UO_2 as Nuclear Fuel	172
Properties of UO_2	172
Applied Forms of UO_2	173
Pellets and Other Shapes	174
Coated Fuel Particles	177
3.2.2 Uranium-Gadolinium Dioxide	177
3.2.3 Uranium-Plutonium Dioxide	178
Properties	178

	Page
3.2.4 Uranium-Thorium Dioxide	180
Properties of (U,Th)O ₂	180
Fuel for High Temperature Reactors	182
Fuel Elements for High Temperature Reactors	184
Irradiation Behavior	184
3.2.5 Other Oxide Systems	186
3.3 Carbide Nuclear Fuels	192
Review in English	193
General References	193
3.3.1 Shaped Uranium Carbide	193
Properties of the Uranium Carbides	193
Carbide Fuel Rods and Pellets	194
Use of UC in Nuclear Reactors	194
3.3.2 Uranium and Uranium-Thorium Carbides as Coated Fuel Particles	195
Generalities	195
Structure and Production	195
Irradiation Behavior	196
3.3.3 Uranium-Plutonium Monocarbide	196
Use of (U,Pu)C for Fast Breeder Reactors	196
The U-Pu-C System	196
Production of (U,Pu)C	196
Irradiation Behavior	197
3.3.4 Other Carbide Systems	197
3.4 Nitride Nuclear Fuels	201
Review in English	201
General References	202
3.4.1 Properties and Uses	202
3.4.2 Production of UN and (U,Pu)N Fuels	203
3.4.3 Irradiation Behavior	204
3.5 Combined Ceramic Systems as Nuclear Fuels	206
3.5.1 Oxide Carbides	207
3.5.2 Carbide Nitrides	207
3.5.3 Oxide Nitrides	208
3.5.4 Other Systems	208

	Page
3.6 Other Uranium Compounds as Nuclear Fuels	209
Review in English	209
General References	209
3.6.1 Uranium Sulfides	209
Preparation of Uranium Sulfides	210
Properties of Uranium Monosulfide	211
Irradiation Behavior of US	213
Combined Systems involving US	214
3.6.2 Phosphides	215
Preparation of UP	215
Properties of UP	216
3.6.3 Other Uranium Compounds	216
Uranium Borides	216
Uranium Beryllide	218
Uranium Selenides and Tellurides	221
Uranium Arsenide and Antimonide	222
Further Uranium Compounds	222
3.7 Dispersion Fuels	224
Review in English	225
Theory of Dispersed Fuels	226
Production Processes for Dispersed Fuels	228
3.7.1 Dispersed Fuels Based on Aluminium	228
U-Al Compounds in an Al Matrix	229
UO_2 or U_3O_8 in an Al Matrix	229
Irradiation Behavior of Al-Based Systems	229
3.7.2 Dispersion Fuels with a Stainless Steel or a Nickel-Based Alloy Matrix	230
Production Processes	230
Properties of the Dispersed Fuels	231
Cermet Fuels	231
Irradiation Behavior	231
3.7.3 Graphite-Based Dispersed Fuels	232
Embedding of the Coated Particles in the Graphite Matrix	232
Properties and Irradiation Behavior of Graphite-Based Dispersed Fuels	232
3.7.4 Dispersed Fuels with an Oxide Matrix	233
BeO-UO_2	233
Production of BeO-UO_2 Dispersed Fuels	233
Properties of BeO-UO_2 Dispersed Fuel	234
Irradiation Behavior of BeO-UO_2 Dispersed Fuels	235

	Page
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$	235
Production and Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$ Dispersed Fuel	235
Irradiation Behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$ Dispersed Fuel	236
MgO-UO_2	236
$\text{SiO}_2\text{-UO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-U}_3\text{O}_8$	236
3.7.5 Dispersed Fuels Based on Refractory Metals. Other Systems	237
W- UO_2	237
Production of W- UO_2 Dispersions or Cermets	237
Properties of W- UO_2 Dispersions or Cermets	237
Mo- UO_2 , Mo-UC, Mo-UN	238
Nb- UO_2	239
Zr(Zr-Alloy)- UO_2	239
Ta- UO_2	240
Cr- UO_2 , Cr-UN	240
Be- UBe_{13} , Be- UO_2 , Be-UC	240
Mg- UO_2	240
$\text{ZrH}_x\text{-U}$	240
3.8 Liquid and Gaseous Nuclear Fuels	243
Review in English	243
General References	243
3.8.1 Aqueous Nuclear Fuels	244
Aqueous Solutions of Uranium Compounds	245
Uranyl Sulfate	245
Uranyl Nitrate	245
Uranyl Fluoride	246
Uranium Phosphates	246
Uranyl Chromate	246
Uranyl Carbonate	246
Physical Properties of Aqueous Solutions of Uranium Salts	246
Suspensions of Uranium Compounds	247
3.8.2 Liquid Metal Nuclear Fuels	247
Liquid Metal-Uranium Alloys	248
Liquid Metal Suspensions	249
"Soluble" Slurry	249
"Insoluble" Slurry	249
3.8.3 Molten Salts	249
Molten Fluorides	250
Physical and Thermal Properties of Molten Fluorides	250
Other Properties	252
Molten Chlorides	252

	Page
3.8.4 Gaseous Nuclear Fuels	253
Uranium Hexafluoride	253
Uranium Plasma at High Temperatures	255
Survey of Gas-Phase Reactors	255
4 Production of Nuclear Fuels	259
4.1 Oxide Fuels	259
4.1.1 Production of UO_2 Pellets, Including $\text{UO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ Mixed Oxide Pellets	259
The Sintering Technology of UO_2	260
Grinding to Powder	260
Preparation of Granules by Precompaction.	260
The Pressing	260
The Sintering	262
The Polishing	263
Radiation Protection.	263
Production of $\text{UO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ Mixed Oxides	263
4.1.2 UO_2/PuO_2 Mixed Oxide Pellets	263
4.1.3 Other Processing Methods	263
Swaging Technique	263
Molten Powder	264
Vibration Technique	264
4.2 Production of Fuel Particles	265
4.2.1 Generalities	265
4.2.2 Production by Dry Processes	266
4.2.3 Production by Wet Chemistry	266
4.2.4 Coating of the Fuel Kernels	269
4.3 Carbide and Nitride Fuels	271
4.3.1 Carbide Fuels	271
4.3.2 Nitride Fuels	274
4.4 Metallic and Cermet Fuels	275
4.4.1 Introduction	275
4.4.2 Preparation of the Uranium Metal	275
4.4.3 Fuel "Pictures" of U-Al Alloys	276
4.4.4 Cermets	277
4.4.5 Fuel Cladding by Roll-Plating	278

	Page
5 Other Uses	280
5.1 Introduction	280
5.2 Use as Material for Radiation Shielding	280
5.2.1 Generalities	281
Corrosion Behavior, Contamination Danger	281
Natural Radioactivity of ^{238}U	281
Working of Uranium	284
5.2.2 Material for Shielding against γ -Radiation	284
5.2.3 Shielding against Neutrons	290
5.3 Neutron Production by Fast Neutron Bombardement	291
5.4 Uranium in Radiation Hardening and Homogenizing Filters	293
Table of Conversion Factors	296

Inhaltsverzeichnis

(Table of Contents see page I)

	Seite
1. Aufbereitung von Uranerzen und Gewinnung eines verkaufsfähigen Produkts	1
Zusammenfassung	1
1.1. Uranerze und ihre wirtschaftliche Bedeutung	1
1.2. Qualitätsanforderungen an das verkaufsfähige Produkt „Yellow Cake“	3
1.3. Prinzipien der Aufbereitung von Uranerzen	5
1.4. Alternativen bei der derzeitigen Aufbereitung von Uranerzen	5
1.4.1 Die hydrometallurgischen Prozesse	7
Laugung des Erzes mit Säuren	7
Laugung des Erzes mit Alkalien	9
1.4.2 Der Verfahrensgang der Uranerzaufbereitung	11
Vorzerkleinerung des Erzes in Brechern	11
Vorsortierung von grobem Fördererz	12
Mahlung und Klassierung des Erzes	14
Vorbereitung des zerkleinerten Erzes für die Laugung	15
Laugung des Uranerzes	17
Laugung ohne Druck	18
Drucklaugung	19
Neuere Laugungsverfahren	21
Stark saure Laugung	21
Perkolationslaugung	23
Bakterielle Laugung	26
In-situ-Laugung	27
Laugung von Uran aus Phosphaten	29
Trennung von Feststoff und Laugungslösung vor der Extraktion des Urans	34
Flockung von Erztrüben	35
Vakuumfiltration	36
Dekantieren	38
Zyklonieren	40
Zentrifugieren	41
Feinstabscheidung von Feststoff	42
Abtrennung des Urans durch Ionentausch	42
Einführung, Abgrenzung der Verfahren	42
Fester Ionenaustausch	43
Ionenaustauscherharze	43
Austauschreaktionen	44
Vergiftung und Verschmutzung der Ionenaustauscherharze	44
Physikalische Eigenschaften der Austauscherharze	46
Beladung	46
Elution	47

	Seite
Verfahrenstechnik der Ionenaustauschprozesse	47
Festbettverfahren	47
Ionenaustausch aus Suspensionen	48
Kontinuierlicher Ionenaustausch	48
Kontinuierliche betriebliche Austauschersysteme	49
Zukunftsansichten der Ionenaustauschprozesse in der Uranaufbereitung	51
Solventextraktion	52
Prinzip	52
Extraktion	53
Die organische Phase	53
Phasenmischung	56
Phasentrennung	57
Reextraktion	57
Verluste an Extraktionsmittel und Reextraktionsmittel	58
Störungen der Extraktion und Entfernung von störenden Metallen	59
Extraktion aus der Trübe	59
Apparate	60
Der ELUDEX-Prozeß	62
Vergleich der Anwendung von festem Ionenaustausch und Extraktion	62
Neuartige, seltene Prozesse	63
Herstellung des verkaufsfähigen Produktes	63
Kennzeichnung des Produktes	63
Ausgangslösungen für die Urangewinnung	64
Methoden der Uranfällung	64
Übersicht	64
Fällung aus alkalischen Lösungen	65
Stark alkalische Fällung	65
Fällung durch Neutralisierung	66
Fällung durch Reduktion mit Wasserstoff	66
Andere Fällungsverfahren für alkalische Laugen	66
Fällung aus sauren Lösungen	67
Fällung durch Neutralisierung	67
Fällung mit Wasserstoffperoxid	68
Apparate zur Uranfällung	68
Entwässerung, Trocknung und Verpackung des Produktes	69
Entwässerung, Eindickung	69
Trocknung	69
Verpackung	70
1.5 Abgänge der Uranaufbereitung	70
1.5.1 Schlammteich und Halden	70
1.5.2 Gasförmige Abgänge	72
1.6 Prozeßüberwachung	72
1.6.1 Allgemeines	72
1.6.2 Analytik	72
1.6.3 Metallurgisches Laboratorium	73
1.6.4 Strahlenschutz	73