

Thorsten Schurse

Der Beitrag von Thorium zur (U+TH)/He-Datierung

Quantitative photometrische Messungen im Spurenbereich

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 1995 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783832405397

Thorsten Schurse

Der Beitrag von Thorium zur (U+TH)/He-Datierung

Quantitative photometrische Messungen im Spurenbereich

Thorsten Schurse

Der Beitrag von Thorium zur (U+TH)/He-Datierung

Quantitative photometrische Messungen im Spurenbereich

Diplomarbeit
an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
August 1995 Abgabe



Diplomarbeiten Agentur
Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke
und Guido Meyer GbR

Hermannstal 119 k
22119 Hamburg

agentur@diplom.de
www.diplom.de

ID 539

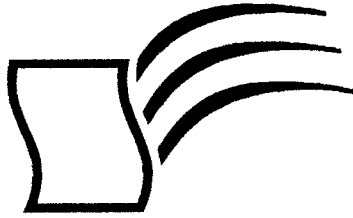
Schurse, Thorsten: Der Beitrag von Thorium zur (U+TH)/He-Datierung: Quantitative photometrische Messungen im Spurenbereich / Thorsten Schurse – Hamburg: Diplomarbeiten Agentur, 1997
Zugl.: Heidelberg, Universität, Diplom, 1995

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachrucks, 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 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

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.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey, Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke & Guido Meyer GbR
Diplomarbeiten Agentur, <http://www.diplom.de>, Hamburg
Printed in Germany



Diplomarbeiten Agentur

Wissensquellen gewinnbringend nutzen

Qualität, Praxisrelevanz und Aktualität zeichnen unsere Studien aus. Wir bieten Ihnen im Auftrag unserer Autorinnen und Autoren Wirtschaftsstudien und wissenschaftliche Abschlussarbeiten – Dissertationen, Diplomarbeiten, Magisterarbeiten, Staatsexamensarbeiten und Studienarbeiten zum Kauf. Sie wurden an deutschen Universitäten, Fachhochschulen, Akademien oder vergleichbaren Institutionen der Europäischen Union geschrieben. Der Notendurchschnitt liegt bei 1,5.

Wettbewerbsvorteile verschaffen – Vergleichen Sie den Preis unserer Studien mit den Honoraren externer Berater. Um dieses Wissen selbst zusammenzutragen, müssten Sie viel Zeit und Geld aufbringen.

<http://www.diplom.de> bietet Ihnen unser vollständiges Lieferprogramm mit mehreren tausend Studien im Internet. Neben dem Online-Katalog und der Online-Suchmaschine für Ihre Recherche steht Ihnen auch eine Online-Bestellfunktion zur Verfügung. Inhaltliche Zusammenfassungen und Inhaltsverzeichnisse zu jeder Studie sind im Internet einsehbar.

Individueller Service – Gerne senden wir Ihnen auch unseren Papierkatalog zu. Bitte fordern Sie Ihr individuelles Exemplar bei uns an. Für Fragen, Anregungen und individuelle Anfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Wir freuen uns auf eine gute Zusammenarbeit

Ihr Team der *Diplomarbeiten Agentur*

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey –
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke —
und Guido Meyer GbR —————

Hermannstal 119 k —————
22119 Hamburg —————

Fon: 040 / 655 99 20 —————
Fax: 040 / 655 99 222 —————

agentur@diplom.de —————
www.diplom.de —————

Inhalt

Schlüsselbegriffe	vii
Kurzfassung	vii
Key Words	ix
Abstract	ix
1 Einleitung	1
1.1 Geochronometrie - physikalische Datierung von Gesteinen.....	1
1.2 Die dieser Arbeit zugrundeliegende Datierungsmethode.....	1
1.3 Problemstellung	2
1.4 Aufgabenstellung	2
1.5 Ansatz und Durchführung der Arbeit	3
2 Grundlagen des Arbeitsgebiets	5
2.1 Die (U+Th)/He-Datierungsmethode	5
2.1.1 α -Zerfälle	5
2.1.2 Prinzip der Methode	6
2.1.3 Grundlegende Voraussetzungen für geophysikalische Datierungen	8
2.1.4 Störanfälligkeiten der (U+Th)/He-Datierung	9
2.1.5 Für Heliumdatierungen geeignete Minerale	11
2.2 Thorium als Bestandteil der Heliumdatierung	12
2.2.1 Kurzer Abriß der Geochemie von Thorium	12
2.2.2 Der Thorium-Beitrag zur Heliumproduktion	13
2.2.3 Th/U-Verhältnisse	15
2.2.4 Meßmethoden zur Thoriumbestimmung	17
2.3 Physik der photometrischen Konzentrationsbestimmung	19
2.3.1 Licht in Materie	19
2.3.1.1 Licht als elektromagnetische Strahlung	19
2.3.1.2 Durchgang von Strahlung durch Materie	19
2.3.1.3 Anregung von Atomen und Molekülen	21
2.3.1.4 Der absorbierte Anteil	23
2.3.1.5 Verhalten an Grenzflächen	24
2.3.2 Photometrische Konzentrationsbestimmungen	25
2.3.2.1 Prinzip der quantitativen Spektralphotometrie	25
2.3.2.2 Das Gesetz von (Bouguer-) Lambert-Beer	26
2.3.2.3 Aufbau von Photometern	29
2.4 Durchführung und Grenzen photometrischer Bestimmungen	32
2.4.1 Vorbereitung der Proben	32
2.4.2 Photometrische Messung	33
2.4.3 Genauigkeit und mögliche Verbesserungen	35
2.4.3.1 Gerätebedingte Fehler	35
2.4.3.2 Chemische Fehler	37
2.4.3.3 Sonstige Fehlerquellen	37
2.4.3.4 Kalibrierung	38
2.4.3.5 Verbesserungsmöglichkeiten	38
2.5 Grundzüge der Mineralogie der untersuchten oxidischen Eisenerze	40
2.5.1 Das Mineral Hämatit	40
2.5.2 Das Mineral Magnetit	41
2.6 Grundzüge der Mineralogie der untersuchten sulfidischen Eisenerze	43
2.6.1 Das Mineral Pyrit	43
2.6.2 Das Mineral Pyrrhotin	44

3 Arbeiten zur Entwicklung und Verbesserung des Meßverfahrens	45
3.1 Chemischer Aufschluß	45
3.2 Separation des Thoriums	46
3.2.1 Das frühere Verfahren	46
3.2.2 Untersuchung des Verfahrens	47
3.2.3 Das abgeänderte Verfahren	48
3.3 Photometrie	56
3.3.1 Die Eigenschaften des Meßgeräts	56
3.3.2 Wahl des chemischen Verfahrens zur Thoriumbestimmung	58
3.3.3 Beschreibung der farbgebenden Reaktion	59
3.3.4 Entwicklung des Verfahrens	63
3.3.4.1 Früheres Verfahren	63
3.3.4.2 Notwendigkeit der Neuentwicklung	64
3.3.4.3 Grundlegende Arbeiten zur Re-Implementierung des Verfahrens	66
3.3.4.4 Aufbauende Untersuchungen zur Verfahrensverbesserung	71
3.3.4.5 Das neu etablierte Standardverfahren	73
3.3.4.6 Erreichte Verbesserungen	75
3.3.4.7 Grenzen der Verfahrens	77
3.4 Genauigkeit der Thorium-Bestimmung	81
4 Proben und Meßergebnisse	85
4.1 Das Proben-Material	85
4.1.1 Auswahl-Kriterien	85
4.1.2 Beschreibung der Proben	86
4.2 Thorium-Bestimmungen dieser Arbeit	88
4.2.1 Thorium-Konzentrationen	88
4.2.2 Th/U-Verhältnisse	90
5 Diskussion der Thorium-Bestimmungen	93
5.1 Vergleich mit früheren Ergebnissen	93
5.1.1 Thorium-Konzentrationen	93
5.1.2 Th/U-Verhältnisse	96
5.2 Die Wertebereiche	98
5.2.1 Thorium-Konzentrationen	98
5.2.2 Th/U-Verhältnisse	99
5.3 Die Thorium-Beiträge zur Heliumproduktion	101
5.3.1 Uran-Äquivalente	101
5.3.2 Thorium-Anteile an der Heliumproduktion	104
5.4 Auswirkung auf die Altersangaben der Proben	106
5.4.1 Einzelindizes	106
5.4.2 Isochronen	116
6 Schlußfolgerungen	121
6.1 Zusammenfassung der Ausführungen	121
6.2 Interpretation der Ergebnisse	122
6.3 Möglichkeiten zur Abschätzung von Thorium-Konzentrationen	123
6.4 Künftiges Vorgehen	124
6.5 Ausblick	127
A Anhang	I
A.1 Verdünnungsprotokoll für die Standardlösung	I
A.2 Rohdaten der photometrischen Messung	III
A.3 Überlegungen zu künftigen Messungen	VIII
Literaturverzeichnis	XIII

Schlüsselbegriffe

Physikalische Altersbestimmung, Radioaktive Umwandlungen, (U+Th)/He-Datierungsmethode, Thorium-Konzentrationsmessung an Mineralen, Photometrie, Arsenazo III, Anionen-Chromatographie, Präzision und Genauigkeit von Thoriumbestimmungen, Fehleranalyse

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht den Beitrag von Thorium zur Heliumproduktion in verschiedenen Eisenerzen unterschiedlicher Lokalitäten im Hinblick auf die physikalische Altersbestimmung der Minerale mit der (U+Th)/He-Methode.

Die (U+Th)/He-Datierungsmethode beruht auf der Anreicherung von Helium in Mineralen durch Zerfälle der Uran- und Thoriumreihen. Die Eignung der untersuchten Eisenerze für die Datierungsmethode wurde in vorangegangenen Arbeiten gezeigt. Aus diesen Arbeiten sind die Uran- und Heliumkonzentrationen der untersuchten Proben bekannt. Die Thoriumkonzentrationen waren nur für einige der Proben bestimmt worden. Sie wurden α -spektroskopisch ermittelt. Die Meßgenauigkeit der Thoriumbestimmung führte zu Datierungen, die heutigen Ansprüchen nicht mehr gerecht werden. Für die übrigen Proben waren keine Thorium-Bestimmungen durchgeführt worden und zur Datierung Annahmen bezüglich ihrer Thoriumkonzentrationen gemacht worden, die überprüft werden mußten.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, zu den vorhandenen Uran- und Helium-Datensätzen Thorium-Analysen zu ergänzen bzw. zu präzisieren. Die Thorium-Konzentrationsbestimmungen dieser Arbeit erfolgten photometrisch mit Arsenazo III als Komplexbildner. Zur Vorbereitung wurden die Proben (mineralogisch reine Körnerpräparate) chemisch aufgeschlossen und das enthaltene Thorium durch Ionenchromatographie mit Anionenaustauschern separiert. Das vorhandene Meßverfahren wurde überprüft und zu großen Teilen neuentwickelt. Die Kalibrierung erfolgt jetzt mit Einwaagen eines verdünnten Thorium-Flüssigstandards NBS-SRM 3159. Die neue Zusammensetzung der Photometrielösung wurde auf die Bestimmung kleinster Thoriummengen eingerichtet. Durch die Verwendung einer Blindlö-

sung ohne Zusatz des Komplexbildners gelang es, eine früher vorhandene zeitabhängige Drift der Meßergebnisse zu beseitigen. Die Veränderungen führten zu einer Erhöhung der Präzision des Verfahrens um nahezu eine Größenordnung, wie Fehleranalysen ergaben. Für Thoriummengen nahe der Nachweisgrenze von 60 ng Thorium in 0,8 g Probeneinwaage gilt dies auch für die Steigerung der Genauigkeit.

Für Proben mit hohen Thoriumkonzentrationen ($> 0,2 \mu\text{g/g}$) weichen die Meßergebnisse deutlich von den früheren Annahmen ab. Auch für einige der Proben mit vorhandenen früheren Thoriummessungen ergaben sich signifikant veränderte Werte. Mit den Meßergebnissen wurden die Th/U-Verhältnisse und Heliumindizes der Proben neu berechnet. Mit diesen Ergebnissen wurden die Anteile an der Heliumproduktion der Proben, die auf die Thorium-Zerfallsreihe zurückgehen, ermittelt. Diese Anteile streuen über mehr als drei Größenordnungen. Für Lokalitäten mit hohen Thorium-Anteilen mußten frühere Datierungen (Einzel-Indizes und Isochronen-Datierungen) signifikant korrigiert werden. Die Genauigkeit erhöhte sich auch für die übrigen Altersangaben.

Aus den Verteilungen der Uran- und Thoriumkonzentrationswerte konnte eine Abschätzung der Thoriumgehalte für künftige Datierungen entwickelt werden. Damit bei der Datierung einer Lokalität auf Thorium-Messungen bis auf Stichproben verzichtet werden kann, muß die Lokalität neben niedrigen Th/U-Verhältnissen (maximal 0,05) auch eine kleine Streuung der Urankonzentrationen (bis ca. $\pm 50\%$ um den Mittelwert) besitzen.

*The contribution of thorium
to the (U+Th)/He dating method -
Quantitative photometric determinations
of thorium trace amounts*

Key Words

Physical age determination, radioactive transmutation, (U+Th)/He method of dating, measurement of the concentration of thorium in minerals, photometry, arsenazo III, anion chromatography, precision and accuracy of thorium determinations, error analysis

Abstract

This study deals with the contribution of thorium to helium production in different iron ores from various localities with regard to the physical age determination of the minerals with the (U+Th)/He method.

The (U+Th)/He dating method rests upon the accumulation of helium in minerals through the decays of the uranium and thorium series. The suitability of the concerned iron ores for this dating method has been proved in previous studies, from which the uranium and helium concentrations of the analysed samples are known. The thorium concentrations were only determined for a few of these samples. They were measured by α -spectroscopy. The inaccuracy in the thorium measurement led to datings which do not meet current standards. The other samples have not been subject to thorium determinations. Their thorium concentrations were merely estimated for dating purposes, so that these findings had to be checked.

The object of the study on hand was to add an improved thorium analysis to the already existing uranium and helium data. The thorium concentration determination of this work was ascertained by photometry, using arsenazo III as the complex

forming substance. In preparation, the samples (which were pure grain separates) were chemically decomposed and the contained thorium was separated by ion chromatography using anion exchangers. The measurement procedure used so far was tested and in many areas totally changed. The calibration is now carried out by weighed quantities of the diluted liquid thorium standard NBS-SRM 3159. A new composition of the solution used for photometry was developed for the measurement of trace amounts of thorium. With the help of a comparative solution without the complex forming substance it was possible to eliminate the previous time related drift of the measuring results. As error analyses have shown, these changes increased the precision of the procedure by nearly one order. The same is also true for the accuracy close to the detection limit of 60 ng of thorium in 0.8 g of the sample.

The results for samples with high concentrations of thorium ($> 0.2 \mu\text{g/g}$) deviate considerably from earlier assumptions. Some of the measurements of samples which had been subject to thorium measurements before showed significantly different values as well. The results allowed to calculate the Th+U ratios and the helium indices. With these results the proportions of helium production in the samples were established in sole relation to the thorium decay series. These proportions are spread out over more than three orders. Previous age results for localities with high thorium proportions (using single indices or isochrone dating) must be significantly corrected. In addition, the accuracy could also be improved for the remaining age data.

From the distribution of uranium and thorium concentration values, a method for the prediction of thorium contents could be developed for future dating. In order to be able to do without thorium measurements (with the exception of random checks) in the attempt to date a locality, the locality has to meet certain criteria: the Th/U ratios must be low (0.05 maximum) and the uranium concentrations must not differ by more than 50 % from their average value.

1 Einleitung

1.1 Geochronometrie - physikalische Datierung von Gesteinen

Neben Stratigraphie und Chronographie (zu diesen vgl. Simon und Lippolt 1967) nimmt die Chronometrie eine bedeutende Stellung in der Geochronologie - der Zeitrechnung und Zeiteinteilung für die Erdgeschichte - ein. Man versteht darunter die Datierung von Gesteinen, welche die darin enthaltenen radioaktiven Nuklide als Zeitmesser nutzt. Im Idealfall ist damit eine absolute Datierung möglich, im Gegensatz zu den relativen Einordnungen der beiden anderen genannten Methoden der Geochronologie. Häufig wird daher der Begriff Geochronologie ausschließlich synonym für die eigentliche Chronometrie verwendet, ohne Stratigraphie und Chronographie zu umfassen.

Die enormen Fortschritte bei den physikalischen und chemischen Spurenstoffanalysen in den vergangenen Jahrzehnten stellten der Chronometrie eine Vielzahl von radioaktiven Systemen als Werkzeuge zur Verfügung.

Um mit isotopischen Methoden zu korrekten Altersangaben zu gelangen, müssen weitreichende Voraussetzungen erfüllt sein. So kann ein Ereignis nur dann datiert werden, wenn es durch Fraktionierung von Isotopen eine datierbare Marke erzeugt hat, "die radioaktive Uhr auf Null gestellt hat". Ist ein Mineral seitdem ein geochemisch geschlossenes System gewesen, kann man aus den heutigen Konzentrationen von Mutter- und Tochterisotopen die seit dem Ereignis verstrichene Zeit bestimmen: Das Alter des Minerals.

1.2 Die dieser Arbeit zugrundeliegende Datierungsmethode

Die (U+Th)/He-Datierungsmethode ist die älteste isotopische Datierungsmethode. Sie beruht auf dem mehrgliedrigen radioaktiven Zerfall der langlebigen α -Strahler ^{238}U , ^{235}U und ^{232}Th in die stabilen Blei-Isotope ^{206}Pb , ^{207}Pb und ^{208}Pb .

Andere Methoden übertreffen die (U+Th)/He-Datierung oft an Genauigkeit, so daß sie relativ selten angewandt wurde. Ihre Schwachstelle ist im allgemeinen die Heliumdiffusion aus den Mineralen. Wegen der vergleichsweise hohen Unsicherheit der Datierungen spricht man gewöhnlich nicht von ermitteltem Alter - man benutzt statt dessen die Bezeichnung "Heliumindex". Einzelindizes sind meist wenig aussagekräftig; daher verwendet man Isochronenansätze (vgl. Lippolt et al. 1981).

In einigen Fällen ist die (U+Th)/He-Methode die bisher einzige Möglichkeit der Datierung. Für viele epigenetische Erzbildungen sind andere Datierungsmethoden nicht anwendbar. Im Laboratorium für Geochronologie (LfG) der Universität Heidelberg wurden daher unterschiedliche Minerale auf ihre Eignung für die (U+Th)/He-Datierung untersucht, u. a. Hämatite, Magnetite, Pyrite und Pyrrhotine. Zum Teil ließen sich an ihnen signifikante Indizes bestimmen. Signifikanzkriterien sind dabei hohe Aktivierungsenergien (Gerling, 1939), niedrige Diffusionskoeffizienten (Lippolt et al., 1963) und genügend hohe Schließtemperaturen (Dodson, 1973).

1.3 Problemstellung

Bei einigen der früheren Untersuchungen des LfG nach der (U+Th)/He-Methode wurde der Thoriumbeitrag zur Heliumproduktion für heutige Standards unzureichend berücksichtigt. Es war damals aus experimentellen Gründen nicht möglich, den Thoriumgehalt der Proben mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Bei einigen Proben wurde ganz auf die Thoriummessung verzichtet. Hier nahm man die Th/U-Verhältnisse als analog zu den gemessenen Verhältnissen geologisch ähnlicher Proben an. Spätere Untersuchungen an anderen, ebenfalls geologisch ähnlichen Mineralen ergaben jedoch teilweise stark von den früheren Ergebnissen abweichende Th/U-Verhältnisse. In der Literatur finden sich für diese Verhältnisse wie auch für die Thoriumgehalte geologisch ähnlicher Minerale große Streubereiche. So erwies sich eine Überprüfung der Analogieannahmen als geboten.

1.4 Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit soll untersuchen, ob sich durch die genauere bzw. erstmalige Bestimmung von Thoriumgehalten verschiedener Mineralproben nennenswerte Abweichungen von den früheren Werten bzw. Annahmen ergeben. Bei den zur Verfügung gestellten Proben handelt es sich um Hämatite und Magnetite sowie je einen Pyrit und Pyrrhotin von unterschiedlichen Lokalitäten. An allen Proben sind zuvor massenspektrometrische Uran- und Heliumbestimmungen durchgeführt worden und Helium-indizes - z. T. mit Isochronenansätzen - bestimmt worden. Das eigentliche Ziel dieser Arbeit ist es daher festzustellen, ob sich durch die Thoriumbestimmungen eine signifikante Änderung bezüglich dieser früher bestimmten Indizes ergibt.

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit erwies es sich als notwendig, das Meßverfahren zu überprüfen und in der Folge zu großen Teilen neu zu entwickeln und zu verbessern. Daher wurde die Aufgabenstellung entsprechend abgeändert. Das Hauptgewicht der Arbeit lag somit auf der Analytik, während die Anzahl der Meßpräparate eingeschränkt wurde.

1.5 Ansatz und Durchführung der Arbeit

Die Schritte auf dem Weg vom natürlichen Gestein zur Thoriumkonzentration zeigt Abbildung 1.1. Es lagen mineralogisch reine Körnerpräparate vor. Deren Thoriumkonzentrationen sollten photometrisch ermittelt werden. Hierzu mußten die Proben durch chemischen Aufschluß und Thoriumseparation mittels Ionenaustauschern geeignet vorbereitet werden.

Während bei den vorbereitenden Schritten frühere Verfahren nach einer Überprüfung weitgehend übernommen werden konnten, war dies bei der Photometrie nicht möglich: die auf dem Gesetz von (Bouguer-)Lambert-Beer beruhende optische Spektralphotometrie ist stark von Veränderungen des chemischen Meßsystems abhängig. Da eine neu gelieferte Analysesubstanz in ihrem Verhalten deutlich von der früher verwendeten Substanz gleichen Namens abwich, war eine Neuentwicklung unumgänglich. Hierbei wurde durch eine genaue Analyse der ins Verfahren eingehenden Fehlerquellen auf eine zusätzliche Verbesserung der Ergebnisse abgezielt.

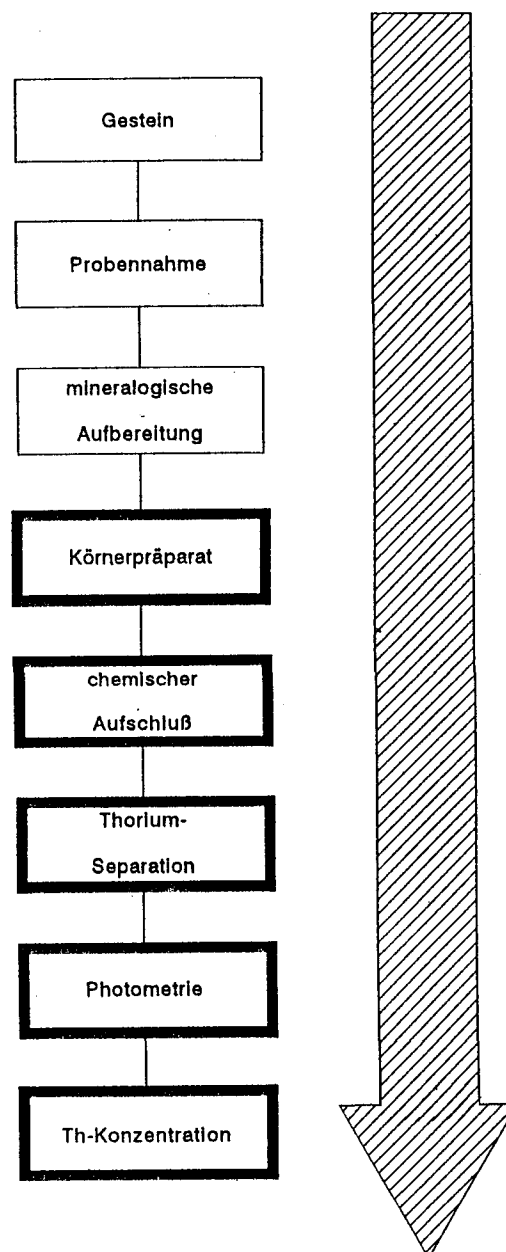


Abb. 1.1

Schritte vom natürlichen Gestein zur Thoriumkonzentration. Bestandteile der vorliegenden Arbeit sind fett umrandet. Vorausgehend wurde in dieser Arbeit das Meßverfahren überprüft und in Folge zu großen Teilen neu entwickelt.