

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Die Neutronen-Aktivierungs-Analyse	5
2.1	Historische Entwicklung der Neutronen-Aktivierungs-Analyse	6
2.2	Einführung in die NAA-Methoden	6
2.3	Neutronen-Klassifizierung	8
3	Neutronenreaktionen und Neutronenquellen	11
3.1	Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie	12
3.1.1	Neutroneneinfang mit simultaner Photonenemission	14
3.1.2	Thermalisierung	15
3.1.3	Nukleare Reaktionen mit schnellen Neutronen	15
3.1.4	Neutronen Absorption und Streuung in der Probe (Selbstabschirmung)	16
3.2	Zeitaufgelöste Neutronenphysik	17
3.3	Neutronenquellen	18
3.3.1	Forschungsreaktor	18
3.3.2	Spallationsquelle	18
3.3.3	Radioisotope - ^{252}Cf und ^{241}Am - ^9Be	19
3.3.4	(D-D) und (D-T) Neutronengenerator	20
4	Photonenreaktion und Detektorsysteme	25
4.1	Wechselwirkungen von Photonen mit Materie	26
4.1.1	Der Photoelektrische-Effekt	26
4.1.2	Der Compton-Effekt	27
4.1.3	Die Paarbildung	28
4.1.4	Abschirmung der Gamma-Strahlung	29
4.2	Detektoren in der Gamma-Spektroskopie	30
4.2.1	Effizienz des Detektors	31
4.2.2	Detektor Typen – Halbleiter-Detektoren	32
5	Das PGNAA-Verfahren	35
5.1	Physikalische Grundlagen der PGNAA mit schnellen Neutronen	36
5.2	Zyklische Neutronen-Aktivierung	38
6	Simulation mit MCNP	43
6.1	Der Computer Code MCNP – Monte-Carlo-Verfahren	44
6.2	Nukleare Daten- und Wirkungsquerschnittbibliotheken	45

6.3	Aufbau der MCNP-Input-Datei	45
6.3.1	Geometriedefinition des MCNP-Modells	45
6.3.2	Die Materialdefinition der MCNP-Geometrie	46
6.3.3	Definition der Primärteilchenquelle	47
6.3.4	Aufgabenstellung für die Simulation – Definition der Tally	47
6.4	Das MCNP-Modell der PGNAA-Anlage	48
7	Instrumenteller Aufbau	51
7.1	Die Experimentierhalle und der Kontrollraum	52
7.1.1	Genehmigung für den Betrieb des Neutronengenerators	54
7.1.2	MCNP-Simulation zur Bestimmung der Äquivalentdosen im Strahlungsumfeld der PGNAA-Anlage	55
7.1.3	Messung der Ortsdosisleistung in den benachbarten Räumen der Experimentierhalle	57
7.1.4	Bestimmung der Personen-Tiefendosis $H_p(10)$ im Umfeld der Graphitkammer	58
7.2	Das PGNAA-Prototypsystem	60
7.3	Die Graphitkammer – Moderator und Reflektor	60
7.4	Der Neutronengenerator	61
7.5	Das Spektrometer	64
7.5.1	Die Nuklearelektronik	65
7.5.2	Optimierung der Nuklearelektronik	66
7.5.3	Detektor-Vergleich	69
7.5.4	Neutronen-Aktivierung des Germanium-Kristalls	72
7.5.5	MCNP-Studie zu Neutronenabschirmung des Detektors	75
7.5.6	Abschirmung thermischer Neutronen	78
7.5.7	Herstellung der ^6Li -Abschirmung	80
7.5.8	Kristallschäden durch Kernreaktionen mit schnellen Neutronen	87
7.5.9	Abschirmung schneller Neutronen	89
8	Energie- und Effizienzkalibrierung	93
8.1	Energiekalibrierung	94
8.2	Untergrundspektrum und Punkteffizienz bis 3 MeV	94
8.3	Bestimmung der Detektor-Punkteffizienz bis 10 MeV	96
8.4	Die Photopeak-Effizienz für eine großvolumige homogene Probe	99
8.5	MCNP-Studie zur Berechnung der Photopeak-Effizienz für ein 50-l-Volumen	104
9	Probenherstellung	107
9.1	Homogene Betonproben mit definierter Schwermetallkonzentration	108
9.2	Herstellung der verschiedenen Probenfässer	111

10	Charakterisierung verschiedener Proben	115
10.1	Hintergrundspektrum der Graphitkammer – Nullprobenmessung	116
10.2	Aktivierung von Einzelproben	117
10.2.1	Harnstoff	117
10.2.2	Natriumchlorid	118
10.2.3	Blei, Cadmium, Quecksilber	118
10.2.4	Gadolinium	120
10.2.5	Strontium	121
10.3	Charakterisierung verschiedener 25-l-Probenfässer	121
10.3.1	Leeres Stahlfass	121
10.3.2	Probenfass 1 – Trockener Beton	122
10.3.3	Probenfass 2 – Trockener Beton mit Schwermetallen	123
10.3.4	Probenfass 3 – Betonfass mit festen Schwermetallabfällen	124
10.3.5	Probenfass 4 – Metallspäne aus der Mechanischen-Werkstatt	125
10.4	Charakterisierung einer Erdreich-Probe	126
10.5	Bestrahlung inhomogener Probenzusammenstellungen	128
10.6	Untersuchung einer Cadmium-Probe in einem betonierten Stahlfass	130
11	Bestimmung der Neutronenflüsse	151
11.1	MCNP-Studie des Neutronenspektrums	152
11.2	Bestimmung thermischer und epithermischer Neutronenspektren mit Resonanzsonden	155
11.3	Neutronenfluss in einer Beton-Probe	158
11.4	Das Stahlfass als Neutronenmonitor	158
11.5	Der thermische Neutronenfluss in Abhängigkeit von der Probenzusammensetzung	161
12	Nachweisgrenzen	165
12.1	Definition der Nachweisgrenze – Werte etablierter PGNAA-Systeme	166
12.2	Nachweisgrenzen des PGNAA-Prototypsystems	166
13	Diskussion und Ausblick	171
13.1	Zyklische Neutronen-Aktivierung	172
13.2	Quantitativer Nachweis – Inhomogene großvolumige Proben	173
13.3	Hochskalierung des Systems für die Charakterisierung von 200-l-Fässern	174
14	Zusammenfassung	175
Anhang		177
A1	Herleitung der zyklischen Neutronen-Aktivierung	177
A2	MCNP-Input-Datei für das PGNAA-System	179
A3	Das Prompt-Gamma-Spektrum einer sehr großen Cadmiummenge	183

A4	Elementanalyse des ${}^6\text{Li}$ -Metalls aus Oak Ridge	184
A5	Analyse des schweren Wassers	184
A6	Aktivitäten der verwendeten Standard-Punktquellen	185
A7	Ergebnisse der Analyse für die Beton-Zusammensetzung	185
A8	Wirkungsquerschnitte von Gold	187
A9	Absolute Effizienz des „Low-Level“-Messplatz-Detektors	187
Abbildungsverzeichnis		189
Tabellenverzeichnis		193
Literaturverzeichnis		195
Danksagung		205