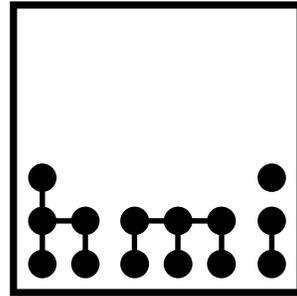


# $\gamma$ -Spektroskopie deformierter Kerne mit binären Reaktionen



Im Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin eingereichte  
Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde

von

Severin Thummerer

aus München

Dezember 1999

Gutachter:

Prof. Dr. Wolfram von Oertzen  
Prof. William Brewer, PhD

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Methodik der Teilchen-<math>\gamma</math>-Spektroskopie</b>	<b>3</b>
2.1	Zielsetzung und allgemeine Methodik der $\gamma$ -Spektroskopie . . . . .	3
2.2	Entwicklung der $\gamma$ -Detektor-Anordnungen . . . . .	5
2.3	Zugängliche Reaktionstypen . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen der Kerndeformation und Compoundkernbildung</b>	<b>13</b>
3.1	Compoundkernbildung und -Zerfall . . . . .	13
3.1.1	Schwerioneninduzierte Reaktionen . . . . .	13
3.1.2	Zustände mit hohem Drehimpuls . . . . .	14
3.1.3	EHF-Methode für Compoundkern-Zerfall . . . . .	17
3.2	Kerndeformation . . . . .	19
3.2.1	Das Nilsson-Modell . . . . .	19
3.2.2	Nilsson-Strutinsky-Rechnungen . . . . .	23
3.2.3	Das $\alpha$ -Cluster-Modell . . . . .	25
3.2.4	Die Harvey-Regeln . . . . .	27
3.2.5	Ergänzende Bemerkungen zur Auswahl geeigneter Reaktionen zur Untersuchung hyperdeformierter Zustände in $\alpha$ -Cluster-Kernen . . .	27
<b>4</b>	<b>Untersuchung binärer Reaktionsmechanismen I: <math>^{36}\text{Ar} \rightarrow ^{24}\text{Mg}</math></b>	<b>31</b>
4.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	31
4.1.1	Das Binary Reaction Spektrometer (BRS) . . . . .	32
4.1.2	Das $\gamma$ -Spektrometer OSIRIS . . . . .	37
4.2	Datenaufbereitung und Eichungen . . . . .	38
4.2.1	Eichung der BRS-Detektoren . . . . .	38
4.2.2	Eichung der OSIRIS-Detektoren . . . . .	43

4.3	Ergebnisse für $^{36}\text{Ar} + ^{24}\text{Mg}$ . . . . .	48
4.3.1	Binäre und nicht-binäre Reaktionskanäle . . . . .	48
4.3.2	Ladungs-Verteilungen . . . . .	49
4.3.3	Massen-Verteilungen . . . . .	51
4.3.4	<i>Out-of-Plane</i> -Winkel-Korrelationen . . . . .	51
4.3.5	Variation des 2-Körper-Q-Wertes . . . . .	57
4.3.6	Teilchen- $\gamma$ -Koinzidenzen . . . . .	58
4.4	Zusammenfassung . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Untersuchung binärer Reaktionsmechanismen II: <math>^{32}\text{S} \rightarrow ^{24}\text{Mg}</math></b>	<b>63</b>
5.1	Wahl des Streusystems . . . . .	63
5.2	Experimenteller Aufbau . . . . .	67
5.2.1	Das $\gamma$ -Spektrometer Euroball . . . . .	68
5.2.2	Der BRS-Aufbau . . . . .	68
5.3	Datenaufnahme, Datenauswertung und Eichungen . . . . .	71
5.3.1	Datenaufnahme . . . . .	71
5.3.2	Datenauswertung . . . . .	72
5.3.3	Eichung der Teilchen-Detektoren . . . . .	72
5.3.4	Eichung der $\gamma$ -Detektoren . . . . .	73
5.4	Identifikation binärer Kanäle . . . . .	76
5.4.1	$^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{46}\text{Ti} + 2\text{p})^8\text{Be}$ . . . . .	77
5.4.2	$^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{44}\text{Ti})^{12}\text{C}$ . . . . .	81
5.4.3	$^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{36}\text{Ar})^{20}\text{Ne}$ . . . . .	83
5.5	Rekonstruktion der Kinematik des nicht-detektierten Kerns . . . . .	83
5.6	Überlegungen zum detektierbaren Wirkungsquerschnitt . . . . .	85
5.7	Zusammenfassung . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Untersuchung der <math>^8\text{Be}</math>-Emission aus binären Reaktionen</b>	<b>89</b>

6.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	89
6.1.1	Das $\gamma$ -Spektrometer GASP . . . . .	89
6.1.2	Der Teilchen-Detektor ISIS . . . . .	90
6.2	$\gamma$ -Yields für $^8\text{Be}$ - und $2\alpha$ -Trigger . . . . .	91
6.2.1	Abschätzung der zufälligen $2\alpha$ -Koinzidenzrate . . . . .	93
6.2.2	$^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{48}\text{Cr})^8\text{Be}$ . . . . .	95
6.2.3	$^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{47}\text{V} + \text{p})^8\text{Be}$ . . . . .	101
6.2.4	$^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{44}\text{Ti})^{12}\text{C}$ . . . . .	106
6.3	EHF-M-Rechnungen für die $^8\text{Be}$ -Emission . . . . .	109
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>



# Abbildungsverzeichnis

1	Nachweiswahrscheinlichkeit für verschiedene $\gamma$ -Folds . . . . .	5
2	Observational Limit I . . . . .	6
3	Observational Limit II . . . . .	7
4	Schematische Aufbauzeichnung von Euroball III . . . . .	8
5	Winkelverteilungen von Verdampfungsrestkernen . . . . .	10
6	Klassifizierung von Wechselwirkungsmechanismen . . . . .	13
7	Schematische Darstellung der Compoundkernabregung . . . . .	16
8	Stabilität des rotierenden Kerns gegenüber Spaltung . . . . .	17
9	Einteilchenzustände im Schalenmodell mit Nilsson-Potential . . . . .	21
10	Drehimpulsprojektionen des Nukleons . . . . .	22
11	Energieniveaus für das Potential eines harmonischen Oszillators . . . . .	23
12	Nilsson-Strutinsky-Rechnungen für $^{20}\text{Ne}$ , $^{24}\text{Mg}$ und $^{32}\text{S}$ . . . . .	24
13	Dichteverteilungen für verschiedene Konfigurationen in $^{56}\text{Ni}$ . . . . .	26
14	Geometrische Anordnungen der $\alpha$ -Cluster in $^{56}\text{Ni}$ . . . . .	26
15	Harvey-Diagramm für die Reaktion $^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{40}\text{Ca})^{16}\text{O}$ . . . . .	28
16	Struktureller Übergang in Folgekernen nach $\alpha$ -Emission . . . . .	29
17	Deformation von $^{48}\text{Cr}$ für verschiedene Werte des Drehimpulses . . . . .	29
18	Aufbau des OSIRIS $\gamma$ -Spektrometers . . . . .	32
19	Aufbauzeichnung der BRS-Teleskope . . . . .	33
20	Aufbauzeichnung der Niederdruckvieldrahtkammer . . . . .	34
21	Schematische Darstellung der Bragg-Ionisationskammer . . . . .	35
22	Funktionsweise der Bragg-Ionisationskammer . . . . .	36
23	Querschnitt durch einen Ge-Detektor . . . . .	37
24	Streuwinkel im Experiment . . . . .	39
25	Ortseichung der MWC . . . . .	40
26	$\bar{\Phi}$ -Verteilung . . . . .	42

27	$\theta^l$ -Verteilung . . . . .	42
28	Braggpeak-Range- und Braggpeak-Energie-Korrelationen . . . . .	44
29	Energie-Eichung der Bragg-Kammern . . . . .	45
30	Energie-Auflösung des OSIRIS-Spektrometers . . . . .	45
31	Zeitsignale der Ge-Detektoren . . . . .	46
32	Winkeldefinitionen für die Dopplerkorrektur . . . . .	47
33	Braggpeak-Range-Korrelationen mit $Z_3 = 12$ . . . . .	50
34	Systematik des Ladungsdefizits $\Delta Z$ . . . . .	50
35	Verteilung der Kernladung $Z_4$ bei festem $Z_3$ . . . . .	52
36	Gemessene Massenverteilung . . . . .	52
37	<i>Out-of-plane</i> -Winkelkorrelationen . . . . .	53
38	Braggpeak-Range-Korrelation für $Z_3=18$ . . . . .	55
39	Summe der Streuwinkel $\theta_3^l$ und $\theta_4^l$ für $Z_3 = 12$ . . . . .	55
40	Verteilung der Streuwinkelsumme $\theta_3^l + \theta_4^l$ . . . . .	56
41	Q-Wert-Verteilung für den Kanal $Z_3 = Z_4 = 15$ . . . . .	57
42	Teilchen-Teilchen- $\gamma$ -Spektrum mit $Z_3 = 12$ und $Z_4 = 14$ . . . . .	58
43	Teilchen- $\gamma$ -Spektrum für $Z_3 = 14$ . . . . .	59
44	Teilchen- $\gamma$ -Spektrum für $Z_3 = 12$ . . . . .	60
45	$\gamma$ -Spektren für $Z_3 = 12$ und $Z_4 = 14$ mit Q-Wert-Variation . . . . .	60
46	Benutzter Reaktionsmechanismus für das $^{32}\text{S}+^{24}\text{Mg}$ -Experiment . . . . .	63
47	Banden in $^{44}\text{Ti}$ . . . . .	65
48	Viola-Systematik für das $^{32}\text{S}+^{24}\text{Mg}$ -Streusystem . . . . .	66
49	Experimenteller Aufbau für das $^{32}\text{S}+^{24}\text{Mg}$ -Experiment . . . . .	67
50	Seitliche Ansicht des Aufbaus . . . . .	69
51	Energie-Braggpeak-Korrelation . . . . .	73
52	Energie-Auflösung des Euroball-Spektrometers . . . . .	75
53	Addback-Faktor als Funktion der $\gamma$ -Energie . . . . .	75

54	Effizienzzeichnung der Ge-Detektoren . . . . .	76
55	Teilchen- $\gamma$ - $\gamma$ -Spektrum für $^{46}\text{Ti}$ bei $E_L = 163.5$ MeV . . . . .	78
56	Niveauschema von $^{46}\text{Ti}$ . . . . .	79
57	Teilchen- $\gamma$ - $\gamma$ -Spektrum für $^{46}\text{Ti}$ bei $E_L = 130$ MeV . . . . .	80
58	Teilchen- $\gamma$ - $\gamma$ -Spektrum für $^{44}\text{Ti}$ . . . . .	81
59	Winkelverteilung für $^{44}\text{Ti}$ und $^{46}\text{Ti}$ . . . . .	82
60	Teilchen- $\gamma$ - $\gamma$ -Spektrum für $^{36}\text{Ar}$ . . . . .	83
61	$\gamma$ -Spektrum aus der Rekonstruktion der inversen Kinematik . . . . .	84
62	Differentieller Wirkungsquerschnitt für $^{44}\text{Ti}$ . . . . .	86
63	Normiertes Teilchen- $\gamma$ - $\gamma$ -Spektrum für $^{44}\text{Ti}$ . . . . .	86
64	Schema-Zeichnung des ISIS-Detektorballs . . . . .	90
65	Teilchenidentifizierung im ISIS- $\Delta E$ - $E$ -Diagramm . . . . .	91
66	$\gamma$ -Projektionen für verschiedene Teilchen-Trigger . . . . .	92
67	Niveauschema für $^{48}\text{Cr}$ . . . . .	96
68	$\gamma$ -Spektrum mit Teilchentrigger auf $^8\text{Be}$ . . . . .	97
69	Verhältnisse der Übergangsstärken in $^{48}\text{Cr}$ , Teil I . . . . .	99
70	Verhältnisse der Übergangsstärken in $^{48}\text{Cr}$ , Teil II . . . . .	99
71	Summe der $\Delta E$ - und $E$ -Signale . . . . .	101
72	$\gamma$ -Spektren für verschiedene Teilchenbedingungen . . . . .	102
73	Niveauschema für $^{47}\text{V}$ . . . . .	103
74	Verhältnisse der Übergangsstärken in $^{47}\text{V}$ , Teil I . . . . .	104
75	Verhältnisse der Übergangsstärken in $^{47}\text{V}$ , Teil II . . . . .	104
76	Niveauschema für $^{44}\text{Ti}$ . . . . .	107
77	Übersicht über die Verhältnisse der Übergangsstärken für $^{44}\text{Ti}$ . . . . .	108
78	Verhältnis der Emissionsrate von $^8\text{Be}$ und zwei $\alpha$ -Teilchen . . . . .	111



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigte sich mit der Teilchen- $\gamma$ -Spektroskopie deformierter Kerne, insbesondere von  $\alpha$ -Cluster-Kernen in der Massengegend  $A = 36 - 56$ . Hier wurden aufgrund theoretischer Modellrechnungen unter Verwendung des Bloch-Brink- $\alpha$ -Cluster-Modells [Zha94b, Zha94a, Rae92] und der Nilsson-Strutinsky-Methode [Lea75] starke Deformationen bis hin zur Hyperdeformation vorausgesagt. Diese stark deformierten Kerne können besonders selektiv in binären Reaktionen gemessen werden. Aufgrund der Harvey-regeln [Har75] läßt sich zeigen, daß diese Konfigurationen besonders gut in dem inversen Streusystem  $^{32}\text{S} + ^{24}\text{Mg}$  bevölkert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in drei Experimenten zwei Streusysteme ( $^{36}\text{Ar} + ^{24}\text{Mg}$  und  $^{32}\text{S} + ^{24}\text{Mg}$ ) mit zwei unterschiedlichen Methoden untersucht. In den Experimenten mit dem Binary Reaction Spectrometer (BRS) wurden binäre Reaktionskanäle mit und ohne anschließender Emission von leichten Teilchen untersucht.

Im ersten Experiment  $^{36}\text{Ar} + ^{24}\text{Mg}$  bei  $E_L = 195$  MeV am HMI wurde das  $\gamma$ -Spektrometer OSIRIS in Verbindung mit dem Teilchenspektrometer BRS verwendet. Im Gegensatz zu Experimenten mit anderen Triggerdetektoren wie ISIS oder Parallelplattenzählern, konnten durch den simultanen Nachweis zweier schwerer Reaktionsfragmente in kinematischer Koinzidenz bei gleichzeitiger Messung der Kernladungen und Energien beider Ejektile binäre Reaktionskanäle in Verbindung mit  $\gamma$ -spektroskopischen Methoden wesentlich selektiver untersucht werden. Gemessen wurden hierbei Teilchen-Teilchen- $\gamma$ -Koinzidenzen. Es zeigte sich eine starke Korrelation der Reaktionsfragmente in der durch die Strahlachse und die Reaktionsfragmente definierten Ebene im Falle des Verlustes von vier oder sechs Kernladungen bei koinzidenter Detektion der beiden schweren Fragmente. Dies entspricht der Verdampfung von zwei oder drei  $\alpha$ -Teilchen. Der Effekt wurde nicht nur bei in der Ladung geradzahligem Fragmenten (z.B.  $Z_3 = 12$ ;  $Z_4 = 14$  ( $^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$ ) oder  $Z_3 = 10$ ;  $Z_4 = 16$  ( $^{20}\text{Ne} + ^{32}\text{S}$ )), sondern auch in Kanälen wie  $Z_3 = 15$ ;  $Z_4 = 11$  ( $^{30}\text{P} + ^{22}\text{Na}$ ),  $Z_3 = 15$ ;  $Z_4 = 9$  ( $^{30}\text{P} + ^{18}\text{F}$ ) oder  $Z_3 = Z_4 = 13$  ( $^{26}\text{Al} + ^{26}\text{Al}$ ) beobachtet.

Die Kombination des BRS-Spektrometers mit dem z.Z. leistungsfähigsten Ge-Detektor-Array, Euroball III, wurde zur Untersuchung des Streusystems  $^{32}\text{S} + ^{24}\text{Mg}$  bei  $E_L = 163.5$  MeV genutzt. Das Experiment fand am LNL, Legnaro (Italien) statt. Hierbei wurde unter Verwendung eines der beiden BRS-Detektoren Spektroskopie von binären Reaktionskanälen betrieben. Insbesondere wurde der binäre Ausgangskanal mit zusätzlicher 2-Protonen-Emission  $^{24}\text{Mg}(^{32}\text{S}, ^{46}\text{Ti} + 2p)^8\text{Be}$  untersucht. Dieses Experiment war der Test des gesamten Setups für ein geplantes Experiment an Euroball IV, mit dem hyperdeformierte Zustände in  $\alpha$ -Cluster-Kernen nachgewiesen werden sollen. Der minimal beobachtbare Wirkungsquerschnitt wurde zu  $\sigma = 21 \mu\text{b}$  aus den Daten ermittelt. Bei der Verwendung beider BRS-Detektoren wird von einer Erniedrigung dieses Wertes um mindestens eine Größenordnung aufgrund der wesentlich höheren Selektivität des Aufbaus bei der Messung zweier schwerer Reaktionsfragmente in kinematischer Koinzidenz ausgegangen. Damit wird dann der bislang beste bekannte Wert von  $\sigma = 5 - 10 \mu\text{b}$  deutlich unterschritten.

Das dritte hier besprochene Experiment,  $^{32}\text{S} + ^{24}\text{Mg}$  bei  $E_L = 130$  MeV, wurde durchgeführt am LNL, Legnaro, unter Verwendung des  $\gamma$ -Spektrometers GASP und des Si-Balls ISIS zum Nachweis leichter geladener Teilchen. Es diente zur Spektroskopie von f7/2-Kernen aus Fusions-Verdampfungs-Reaktionen und lieferte Daten zur Untersuchung der  $^8\text{Be}$ -Emissionen aus dem  $^{56}\text{Ni}$ -Compoundkern. Si-Bälle wie der ISIS-Ball werden üblicherweise zum Nachweis von leichten geladenen Teilchen (p,d und  $\alpha$ ), nicht aber zur Detektion schwererer Teilchen verwendet. So ist die Identifizierung von  $^8\text{Be}$  als Pile-Up-Signal zweier  $\alpha$ -Teilchen eine sehr ungewöhnliche Art der Spektroskopie, auch wenn ein solches Verfahren schon 1972 von Wozniak et al. verwendet wurde [Woz72]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, daß im Falle von deformierten Seitenbanden in  $^{48}\text{Cr}$  und  $^{47}\text{V}$  die Emission von  $^8\text{Be}$ , d.h. die binäre Spaltung des Compoundkerns  $^{56}\text{Ni}$  in  $^{48}\text{Cr} + ^8\text{Be}$ , bevorzugt wird gegenüber der Emission von zwei unkorrelierten  $\alpha$ -Teilchen. Eine unterschiedliche Population der Grundzustands- und Seitenbande wurde auch in  $^{44}\text{Ti}$  beobachtet, diese aber aufgrund der eingeschränkten Statistik nicht eindeutig als Verstärkung des binären Spaltkanals identifiziert.

Zu letzterer Fragestellung wurden Rechnungen, basierend auf der von Matsuse et al. [Mat97] entwickelten *Extended-Hauser-Feshbach*-Methode (EHFM), durchgeführt. Dazu wurde das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für die Emission von  $^8\text{Be}$ - bzw. zwei  $\alpha$ -Teilchen in Abhängigkeit von der Deformation sowohl des Mutter- als auch des Tochterkerns untersucht. In Übereinstimmung mit den Voraussagen aus Arbeiten von Bann und Komoto [Bla80, Bla81] wurde festgestellt, daß eine Verstärkung des  $^8\text{Be}$ -Emissions-Kanals bei höheren Drehimpulsen des Compoundkerns, als im durchgeführten Experiment erreicht, verbunden mit einer größeren Kerndeformation zu erwarten ist.

Die nächsten experimentellen Schritte dieser Untersuchungen sind zum einen die Durchführung des in Abschnitt 5 beschriebenen Experiments zum Nachweis der hyperdeformierten Zustände in  $\alpha$ -Cluster-Kernen an Euroball IV mit dem BRS und einem zusätzlicher Teilchenzähler zum Nachweis leichter geladener Teilchen und zum anderen weiterführende Untersuchungen der  $^8\text{Be}$ -, aber auch  $^{12}\text{C}$ -Emission in Abhängigkeit von der Kerndeformation.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Severin Thummerer  
Adresse: Celsiusstr. 8, 12207 Berlin  
Geburtsdatum und -Ort: 08.11.1968, München  
Familienstand: ledig

## Ausbildung

### Schule

1975-1979 Grundschule an der Fürstenrieder Straße München  
1979-1989 Pestalozzi-Gymnasium München

### Studium

1989-1995 NWF II, Universität Regensburg, Diplomstudiengang Physik  
1994-1995 Diplomarbeit: *Bestimmung von natürlichen Radionuklidkonzentrationen mit der in situ Gammaskopie*, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Oberschleißheim  
1996- Doktorarbeit:  *$\gamma$ -Spektroskopie deformierter Kerne mit binären Reaktionen*, Hahn-Meitner-Institut Berlin



# Danksagung

Ohne die Mitwirkung und Unterstützung vieler Personen wäre die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Prof. W. von Oertzen für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe am Hahn-Meitner-Institut durchzuführen, danken. Die vielen Diskussionen mit ihm haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ohne die Hilfe von Dr. B. Gebauer hätte diese Arbeit erst gar nicht entstehen können. Ich danke ihm für die unzähligen ausführlichen und geduldigen Erklärungen der diversen bis dato für mich unbekanntem Aspekte sowohl auf experimenteller als auch theoretischer Seite auf dem Wege zur Vollendung dieser Arbeit.

Den übrigen Kollegen aus der Arbeitsgruppe SF7 (seit 1.1.2000, vormals FK) danke ich für die gute Zusammenarbeit und die freundliche Aufnahme in ihre Reihen. Zu nennen sind hierbei: Dr. H.G. Bohlen, Dr. Thomas Wilpert, Dr. Martin Wilpert, Dr. Abel Blazevic, Dr. Christian Schulz, Boris Hermann.

Eine besondere Abwechslung waren meine Aufenthalte am Laboratori Nazionali di Legnaro. Für die herzliche Gastfreundschaft und die Zusammenarbeit dort gebührt Dank vor allem Dr. S.M. Lenzi, Dr. D.R. Napoli, Dr. A. Gadea, E. Farnea, Dr. A. Algora und vielen anderen (besonders dem Pizza-Bäcker im Orient-Express und den Weinbauern der Colli Euganei).

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und hier nicht namentlich erwähnt sind, möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen.

Last but not least danke ich meinen Eltern, ohne deren Unterstützung dieser Weg nicht möglich gewesen wäre.