Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band: 44 (1971)

Heft: 7

Artikel: Die Tensorpolarisation von elastisch an 12C gestreuten Deuteronen

zwischen 1,6 und 2,7 MeV

Autor: Meyer, H.O. / Huber, P. / Baumgartner, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-114314

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Tensorpolarisation von elastisch an ¹²C gestreuten Deuteronen zwischen 1,6 und 2,7 MeV

von H. O. Meyer, P. Huber und E. Baumgartner

Physikalisches Institut der Universität Basel

(6. V. 71)

Abstract. The spin tensor moments t_{20} , t_{21} and t_{22} of initially unpolarized deuterons elastically scattered from 12 C have been measured with the 3 He(d, p) 4 He reaction as an analyzer of deuteron polarization. The three deuteron polarization parameters are presented as functions of incident deuteron energy between 1.6 and 2.7 MeV at 30°, 51°, 75° and 105° scattering lab angles. A phase-shift analysis of the differential cross-section and the polarization near the 2.50 MeV resonance confirmed the level parameters of the 12.41 MeV level in 14 N as assigned by McEllistrem et al. [5]. No reasonable set of parameters could be found to reproduce the data near the anomaly at 1.79 MeV.

1. Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wird die Messung der Tensorpolarisation von unpolarisiert einfallenden, elastisch an 12 C gestreuten Deuteronen im Energiegebiet der beiden Resonanzen 1,79 MeV und 2,50 MeV beschrieben. Die Untersuchung bezweckt einerseits die schon vorhandenen Polarisationsmessungen an 12 C (d,d) 12 C bei höhern Energien [1], [2] ins Energiegebiet unter 3 MeV fortzusetzen, anderseits am Beispiel von 12 C als Spin-0-Targetkern die Möglichkeiten zu untersuchen, die sich aus Polarisationsmessungen zur Bestimmung von Niveauparametern in Zwischenkernen höherer Niveaudichte ergeben.

Arbeiten verschiedener Autoren über Querschnitte von Kernreaktionen, die zum Zwischenkern ¹⁴N führen, bzw. über Niveauparameter in ¹⁴N sind bei Ajzenberg-Selove [3] zusammengestellt. Insbesondere findet man in der Literatur Messungen von elastischen Anregungsfunktionen und absoluten Wirkungsquerschnitten von 12 C $(d,d)^{12}$ C in unserem Energiegebiet [4–9].

2. Analyse der Deuteronenpolarisation

2.1. Messung der Polarisation

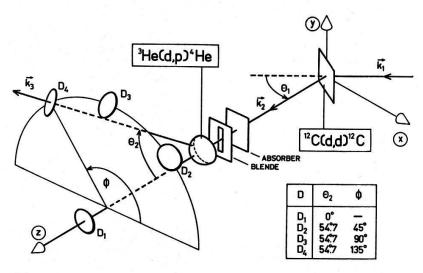
Zur Messung der Tensorpolarisation der gestreuten Deuteronen haben wir die ${}^{3}\text{He}(d,p){}^{4}\text{He-Reaktion}$ ($Q=18,4\,$ MeV) benützt. Der verwendete Zusammenhang

zwischen dem differentiellen Wirkungsquerschnitt dieser Reaktion und der Tensorpolarisation der einfallenden Deuteronen lautet [10], [11]

$$\sigma(\theta_2, \phi) = \sigma_0 \left\{ 1 + f(E) \left[\frac{\sqrt{2}}{4} t_{20} (1 - 3 \cos^2 \theta_2) + \sqrt{3} t_{21} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} t_{22} \sin^2 \theta_2 \cos 2 \phi \right] \right\}.$$
 (1)

Dabei beschreiben die drei reellen t_{2k} die Tensorpolarisation der einfallenden Deuteronen, σ_0 ist gleich dem differentiellen Wirkungsquerschnitt im unpolarisierten Fall und f(E) berücksichtigt nach [10] die Beimischung von $J^{\pi} = 1/2^+$ zum $J^{\pi} = 3/2^+$ des Zwischenkerns [f(E) = 1 für reinen $3/2^+$ -Zustand]. Trotzdem neuerdings Anzeichen dafür gefunden worden sind, dass die Darstellung (1) die wirklichen Verhältnisse nicht in aller Genauigkeit wiedergibt, haben wir (1) für die bei uns auftretenden Deuteronenenergien $E_i < 1000$ keV als exakt richtig angenommen.

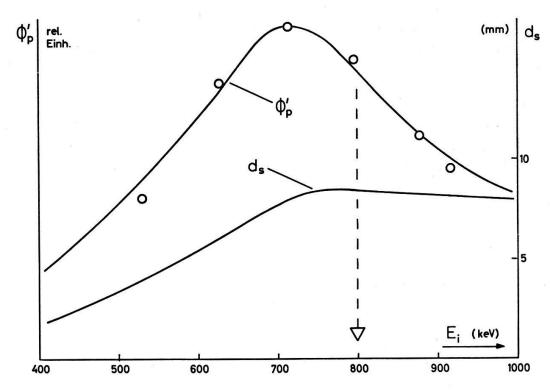
In der Wahl des Koordinatensystems folgen wir der Madison-Konvention [12] (siehe Fig. 1).



Figur 1 Koordinatensystem zur Beschreibung der Deuteronenpolarisation und schematischer experimenteller Aufbau. $D_{1,\,2,\,3,\,4}$ gibt die Lage der vier Detektoren an. $\overrightarrow{k_1}$ und $\overrightarrow{k_2}$ liegen in Richtung der einfallenden bzw. der gestreuten Deuteronen.

Das ³He-Gas (p=3 at) befindet sich in einer Aluminium-Halbkugel (r=1,5 cm) von 0,1 mm Wandstärke, welche auf der Seite der einfallenden Deuteronen durch eine dünne Ni-Folie abgeschlossen wird, die durch ein Ni-Gitter von $\sim 70\%$ Transparenz verstärkt wird.

Der Abstand des Reaktionsschwerpunktes von der Eintrittsfolie ist für Einschussenergien $E_i < 700$ keV stark energieabhängig (siehe Fig. 2). Anderseits hat die Protonenausbeute ϕ_p' pro Raumwinkel und einfallendem Deuteron ein Maximum bei $E_i = 700$ keV. Um Änderungen der geometrischen Verhältnisse im Analysator mit variierender Einschussenergie zu vermeiden, wird $E_i = 800$ keV gewählt. Vor jeder Messung wird die entsprechende Absorberfoliendicke (siehe Fig. 1) durch Messung der Protonenausbeute als Funktion von E_i bestimmt.



Figur 2 Protonenausbeute ϕ_p' der ³He-Target und Abstand d_s des Reaktionsschwerpunkts von der Eintrittsfolie als Funktion der Einschussenergie E_i . Die eingezeichneten Punkte sind mit verschieden dicken Absorberfolien gemessen worden. Die ausgezogenen Kurven sind berechnet aus $\sigma_0(E)$ von ³He(d,p)⁴He und dE/dx von Deuteronen in He. (Targetlänge 15 mm, ³He-Druck 3 at.)

Die Grössen t_{2k} (k=0,1,2) werden anhand der Protonenwinkelverteilung bestimmt. Dazu misst man unter vier Winkeln an den Orten D_j (j=1,2,3,4) (siehe Fig. 1) die relativen Stossraten der ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He-Protonen}$. Damit folgt aus (1) für die drei Tensormomente

$$t_{20} = -\sqrt{2} L_1; \quad t_{21} = \sqrt{3} L_2; \quad t_{22} = \sqrt{3} L_3$$
mit $L_i = \frac{\sum_i - 1}{f(E)} \text{ und } \sum_i = \frac{[\sigma(\theta_2, \phi)]_{D_i}}{\sigma_0}.$ (2)

Die experimentelle Bestimmung von Σ_i aus den relativen Stossraten wird in Kapitel 4.2 erläutert.

2.2. Fehlerbetrachtungen

Berücksichtigt man die endliche Ausdehnung der Protonendetektoren (Raumwinkel $\Omega \sim 6 \cdot 10^{-3}$ sterad) und die Winkelabhängigkeit von (1), so findet man, dass der Schwerpunktswinkel der Detektorempfindlichkeit nicht genau bei den geometrisch definierten Schwerpunktswinkeln θ_2 , ϕ liegt. Die dadurch erforderliche Korrektur der t_{2k} ist in jedem Fall jedoch < 0.02, d. h. klein gegen die statistischen Fehler und ist daher vernachlässigt worden.

Bei der Abbremsung können die gestreuten Deuteronen in den Absorberfolien umgeladen werden. Die Depolarisation, welche durch Spin-Wechselwirkung zwischen Deuteron und eingefangenem Elektron zustande kommt, ist bei den bei uns auftretenden Energien ein vernachlässigbarer Effekt.

Für die beschriebene ³He-Targetanordnung erhält man nach [10] durch gewichtete Mittelung über die Targetlänge für den Faktor f(E) den Wert 0,84. Der Fehler dieses Wertes wird zu \pm 5% geschätzt.

3. Apparatur

Die Streukammer ist schon in den früheren Arbeiten über ${}^4\text{He}(d,\vec{d}){}^4\text{He-Streuung}$ beschrieben worden [13], [14]. Eine mechanische Durchführung mit Targethalter ist neu angebracht worden. Der einfallende Deuteronenstrahl vom 3-MV-Kaskadengenerator wird durch Molybdänblenden kollimiert und trifft dann auf die ${}^{12}\text{C-Target}$.

Als Target wird eine freitragende Graphitfolie verwendet. Die in der Literatur [15], [16] angegebenen Herstellungsverfahren für C-Folien sind für Dicken über 100 µg/cm² ungeeignet. Dickere Folien werden leicht nach folgendem Rezept [17] hergestellt. Ein Objektträger wird in einem Tauchbad mit einer dünnen, planen Seifenschicht überzogen. Nach gründlichem Trocknen wird der Träger in eine kolloidale Graphitlösung [DAG 502¹), Lösungsmittel Isopropanol] getaucht. Verdünnungsgrad und Anzahl Eintauchen bestimmen die Foliendicke. Darauf wird die Kohleschicht in einem Wasserbad vom Träger abgeflutet und mit dem Targethalter von der Oberfläche abgeschöpft. Wir haben Targetdicken zwischen 0,1–0,4 mg/cm² benützt. Die Homogenität der Targetfolien ist durch Absorption von α -Teilchen untersucht worden. Inhomogenitäten liegen unter der Nachweisgrenze dieser Methode (diese liegt bei $\sim 10\%$ der Targetdicke) und damit ist ihr Beitrag zur Energieunsicherheit vernachlässigbar gegen die in Abschnitt 4.2 erwähnten Effekte. Die Lebensdauer der Folien beträgt bei einem einfallenden Deuteronenstrom von 30 μ A auf 5 mm² etwa 4 bis 10 Stunden.

Nach dem Durchgang durch die Targetfolie wird der Strahl im Abstand von 2 m vom Streuzentrum gestoppt. Wegen der Erzeugung von D(d,n)-Neutronen im Strahlfänger ist dieser von den Detektoren möglichst weit entfernt. Der Druck in der Streukammer beträgt etwa $5 \cdot 10^{-5}$ Torr. Vier feste Einsätze in einer Ebene unter den Laborstreuwinkeln θ_1 von 30°, 51°, 75° und 105° dienen zur Entnahme der gestreuten Deuteronen mit einer Winkelauflösung von \pm 2°. Vor Eintritt der Deuteronen in die ³He-Target ermöglichen je sieben wahlweise einschiebbare Aluminium-Absorber die Abbremsung der Teilchen auf die zur Analyse notwendige Energie (siehe Kapitel 2).

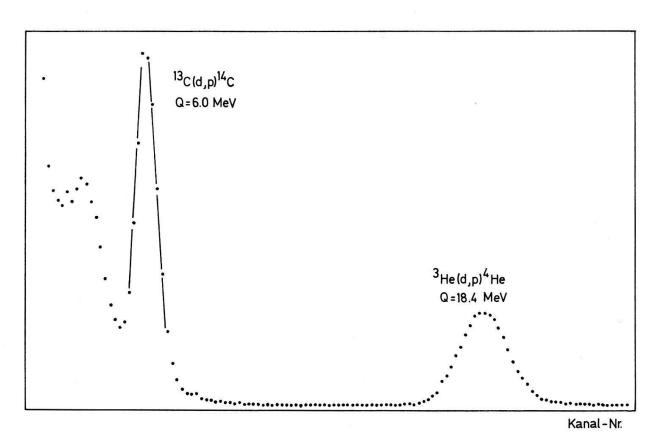
Es ist unter zwei Streuwinkeln gleichzeitig gemessen worden. An einem der beiden freibleibenden Einsätze wird mit einem Si-Oberflächensperrschichtzähler der Targetstrom und die Targetdicke mit einfach gestreuten Deuteronen monitoriert und die Reinheit des ¹²C kontrolliert.

Die durch die ${}^{3}\text{He}(d,\phi)$ -Reaktion erzeugten Protonen werden unter den in Abschnitt 2 erwähnten Winkeln θ_{2} , ϕ mit CsI(Na)-Szintillatorkristallen vollkommen gestoppt (Dicke ~ 2 mm, empfindliche Fläche 7 cm², Abstand vom Reaktionszentrum

¹⁾ Bezogen von Acheson Colloiden N.V., Scheemda-Holland.

9,5 cm). Die erzeugten Lichtimpulse werden von Photomultipliern (150 AVP) umgewandelt und dann verstärkt. Fensterverstärker geben die diskriminierten Signale von simultan 8 Detektoren zur Sortierung an ein Routing-System weiter. Die von einem Analog-Digital-Wandler erzeugten Adressen werden im Gedächtnis eines PDP8/I-Kleinrechners in Form von 8 Spektren gespeichert.

Dank der hohen Lichtausbeute von Na-dotiertem CsI kann man die Protonenimpulse sauber vom Untergrund trennen (siehe Fig. 3).



Figur 3 Beispiel eines p-Spektrums mit CsI(Na)-Kristall unter $\theta_2 = 0^{\circ}$ (linear aufgetragen). Sichtbar sind ausser den ${}^{3}\text{He}(d,p)$ -Protonen auch die aus der ${}^{12}\text{C}$ -Target direkt stammenden ${}^{13}\text{C}(d,p)$ -Protonen.

Es erscheint uns nützlich, an dieser Stelle zwei misslungene Versuche zu erwähnen. Erstens haben wir mit einer differentiell gepumpten [14], gasförmigen 12 C-Target folgende Erfahrungen gesammelt. Die in Frage kommenden, gasförmigen Kohlenwasserstoffe C_nH_m haben alle die Eigenschaft, dass ihre Moleküle im Ionenstrahl aufgebrochen werden. Die Folge davon ist, dass an Orten, wo der Strahl auftrifft (Strahlstopp, Blendenränder), sich eine graphitähnliche Ablagerung bildet.

Dies führt z. B. mit 80 Torr Aethylen (C_2H_4) bei 10 μ A Deuteronenstrom in etwa 20 Minuten zur vollständigen Verstopfung der letzten Strahlblende gegen das Targetvolumen ($\emptyset = 1,4$ mm). Dieser Effekt hängt von der Ordnung des betreffenden Kohlenwasserstoffs ab: mit Methan (CH₄) geht die Ablagerung 10- bis 100mal langsamer vor sich. Dennoch bildet sich am Ort, wo der Strahl auf den Strahlfänger auftrifft, in kurzer Zeit eine Kohleschicht, welche einerseits die Bildung einer Deuterium-

Selbsttarget begünstigt, anderseits selbst eine dicke 12 C-Target darstellt. Dabei entsteht durch die Reaktionen D(d,n) und C(d,n) ein sehr hoher Neutronenuntergrund.

Der zweite misslungene Versuch betrifft die Verwendung von selbstgebauten, lithiumgedrifteten Si-Dioden mit einem diffundierten *n-i*-Übergang (dickes Eintrittsfenster). Diese Detektoren würden sich dank ihrer guten Energieauflösung eignen, sind aber sehr anfällig auf Strahlenschäden.

Die von uns für Detektoren mit ~ 2 mm empfindlicher Dicke gefundene Lebensdauer beträgt etwa 10^{11} Neutronen/cm² (Schadeneinsatz bei etwa 10^{10} n/cm²). Diese Dosis wird bei unserer experimentellen Anordnung mit den für ein Doppelstreuexperiment nötigen, hohen Deuteronenströmen in etwa 30 Stunden erreicht. So reichen vier Dioden nur für einen Messpunkt. Vergleiche mit hochohmigen, dicken Surfacebarrier-Dioden ergeben ähnliche Lebensdauern, während dünne ($\sim 100~\mu$) Si-Oberflächensperrschichtzähler als Monitor während des ganzen Experimentes verwendet worden sind; somit hängt der Schädigungseffekt offenbar lediglich von der empfindlichen Dicke, nicht aber vom Diodentyp ab. Nur wenige der geschädigten n-i-p-Dioden waren durch erneute Drift bei $150\,^{\circ}$ C ausheilbar.

4. Messverfahren

4.1. Eichung

Die gesamte Messeinrichtung wird mit unpolarisierten Deuteronen geeicht. Diese werden mit einem ¹⁹⁷Au-Target (0,8 mg/cm²) durch «reine» Coulombstreuung erzeugt. Es ist darauf geachtet worden, dass bei Eichung und Messung die Targetgeometrie dieselbe bleibt, und dass durch entsprechende Wahl der Deuteronenenergie bei Eintritt ins ³He-Target der Reaktionsschwerpunkt im ³He in beiden Fällen am gleichen Ort liegt.

Der unterschiedliche Verlauf der differentiellen Winkelverteilung für die beiden Targetmaterialien ergibt eine unterschiedliche Ausleuchtung des 3 He-Targets. Die so vorgetäuschte Asymmetrie, die nur t_{21} berührt, kann in unserem Fall vernachlässigt werden.

Die Energieeichung des primären Deuteronenstrahls ist durch Messung der Anregungsfunktionen $^{12}\text{C}(d,d)^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C}(d,p_0)^{13}\text{C}$ im Bereich der 2,5-MeV-Resonanz und Vergleich derselben mit Literaturdaten [4] erhalten worden. Als Streukörper haben wir dabei eine sehr dünne, aufgedampfte $^{12}\text{C-Folie}$ ($\sim 2~\text{keV}$) verwendet. Die so gefundenen Werte stimmen überein mit der bestehenden Energieeichung des Analysatormagneten an unserem 3-MV-Beschleuniger. Die Energie der einfallenden Deuteronen ist damit auf $\pm 5~\text{keV}$ genau bekannt.

Zur Dickenbestimmung der im Experiment verwendeten C-Folien haben wir den Energieverlust der $\alpha\text{-}Teilchen von \,^{241}\!Am$ gemessen.

4.2. Messungen

Eine obere Grenze für die ¹²C-Targetdicke ist durch die verlangte Energieauflösung, eine untere durch die geringen Stossraten gegeben. Die Dicke der Target betrug zwischen 20 keV und 60 keV für 2,5-MeV-Deuteronen.

Die Protonenstossrate ändert als Funktion des Streuwinkels θ_1 und der Energie ziemlich stark. Für die verschiedenen Streuwinkel sind folgende Stossraten n_p für einen einzelnen Protonen-Detektor beobachtet worden:

$$n_p$$
 (30°) = 60–150 Imp/min; n_p (51°) = 7–22 Imp/min; n_p (75°) = 3–10 Imp/min; n_p (105°) = 0,3–2,7 Imp/min.

Gemessen wird jeweils unter den beiden Streuwinkeln θ_1 : 30°/51° bzw. θ_1 : 75°/105° gleichzeitig. Der Anstellwinkel der Targetfolie wird so gewählt, dass die Normale auf die Folie Winkelhalbierende des spitzen Winkels zwischen den beiden Streuwinkeln 30° und 51° bzw. zwischen der Richtung des einfallenden Strahls $(\vec{k_1})$ und dem 75°-Streuwinkel ist.

Die Unsicherheit in der Angabe der Targetdicke wird zu \sim 20% geschätzt und ist zusammengesetzt aus dem Fehler der Dickenbestimmung und dem Fehler des Anstellwinkels bzw. dem Auftreten lokaler Unebenheiten der Targetfolie.

Sei N_i (bzw. N_i^0) die Protonenstosszahl mit 12 C-Target (bzw. 197 Au-Target) am Ort D_i . Damit geschieht die Bestimmung der im Ausdruck (2) verwendeten Grössen Σ_i auf die folgende Weise:

$$\Sigma_{i} = \frac{[\sigma(\theta_{2}, \phi)]_{D_{i}}}{\sigma_{0}} = 2 \frac{\frac{N_{i}}{N_{i}^{0}}}{\frac{N_{2}}{N_{2}^{0}} + \frac{N_{4}}{N_{4}^{0}}}.$$
(3)

Die Zuordnung der Indizes i zu den Zählerorten geht aus Figur 1 hervor. Aus (2) folgt nun die Berechnung der Tensormomente t_{2k} . Die so erhaltenen Werte sind in Tabelle 1 zu finden.

5. Analyse, Ergebnisse

5.1. Resonanzparameteranalyse

Eine Analyse experimenteller Daten nach Streuphasen (Phasenverschiebungen von Partialwellen) geschieht üblicherweise so, dass bei einer festen Energie zu den vorliegenden Messwerten ein bester Phasensatz gesucht wird. Die aus gerechneten und gemessenen Werten gebildete Fehlerfunktion χ^2 [11] wird minimalisiert, indem vorgegebene Anfangsphasen schrittweise geändert werden.

In unserem Fall [12 C (d, d) 12 C um 2 MeV] ist dieses Vorgehen aus verschiedenen Gründen mit Schwierigkeiten verbunden. Einerseits müssen Bahndrehimpulse bis $l_{max} = 3$ berücksichtigt werden, anderseits sind die Phasen komplex, da auch inelastische Kanäle offen sind. Dies erhöht die Zahl der variierbaren Phasengrössen auf 20, ohne dabei die Kopplung zwischen verschiedenen Bahndrehimpulsen zu berücksichtigen. Ferner bringt die Nähe interferierender Niveaus eine starke, unbekannte Energieabhängigkeit der Phasen mit sich, so dass die Zahl der freien Parameter nicht durch vereinfachende Annahmen eingeschränkt werden kann. Damit wird es schwierig, durch Minimalisieren von χ^2 einen als Funktion der Energie glatten und kontinuierlichen Phasensatz zu finden.

Tabelle 1 Die gemessenen Werte der t_{2k} mit ihren statistischen Fehlern als Funktion der Laborenergie (keV). ΔE ist gleich der halben Differenz zwischen grösster und kleinster auftretender Streuenergie. Die Unsicherheit in der Angabe von E_{lab} beträgt etwa 20% von ΔE .

$E_{lab} \pm \Delta E \text{ (keV)}$	t_{20}	t_{21}	t_{22}
	Tensorpolarisation 1	pei $\theta_1 = 30^{\circ}$ L.S.	and the second s
2694±15	$-0,244 \pm 0,018$	$-0,084 \pm 0,022$	$-0,017\pm0,021$
2644 ± 15	-0.214 ± 0.019	-0.038 ± 0.023	$-0,000\pm0,023$
2592 ± 15	$-0,192\pm0,017$	-0.086 ± 0.020	$0,021 \pm 0,020$
2540 ± 15	$-0,152\pm0,016$	-0.072 ± 0.019	$0,031 \pm 0,019$
2514 ± 14	$-0,152\pm0,014$	-0.098 ± 0.018	$0,027 \pm 0,017$
2501 ± 8	$-0,155\pm0,014$	-0.064 ± 0.016	$0,019 \pm 0,016$
2493 ± 16	$-0,134\pm0,014$	-0.068 ± 0.017	$-0,009\pm0,016$
2476 ± 14	$-0,132\pm0,013$	-0.047 ± 0.016	$0,027 \pm 0,016$
2452 ± 16	-0.095 ± 0.011	-0.039 ± 0.013	$0,007 \pm 0,013$
2393 ± 14	-0.047 ± 0.016	-0.018 ± 0.020	$-0,011\pm0,019$
2337 ± 20	-0.065 ± 0.018	-0.051 ± 0.022	$0,014 \pm 0,022$
2288 ± 19	-0.013 ± 0.014	-0.021 ± 0.017	$-0,007\pm0,017$
2238 ± 19	-0.070 ± 0.015	$0,003\pm0,019$	$0,024 \pm 0,019$
2194 ± 13	-0.080 ± 0.016	-0.004 ± 0.020	$0,009 \pm 0,020$
2189 ± 18	-0.037 ± 0.015	-0.021 ± 0.019	$-0,006\pm0,019$
2089 ± 17	-0.008 ± 0.017	$0,008 \pm 0,022$	$0,014\pm0,022$
1988 ± 18	-0.017 ± 0.016	-0.018 + 0.021	-0.013 ± 0.021
1935 ± 21	-0.011 ± 0.016	-0.014 ± 0.020	$0,015\pm0,020$
1884 ± 22	-0.031 ± 0.014	-0.014 ± 0.018	$0,058 \pm 0,018$
1835 ± 21	0.017 ± 0.012	$0,004 \pm 0,016$	$0,024 \pm 0,016$
1811 ± 10	-0.022 ± 0.019	$0,003\pm0,024$	$0,011 \pm 0,024$
1786 ± 20	0.070 ± 0.012	$-0,006\pm0,016$	$0,031\pm0,016$
1760 ± 10	0.039 ± 0.014	0.011 ± 0.018	$0,057\pm0,019$
1735 ± 20	0.074 ± 0.013	$0,007 \pm 0,017$	$0,001\pm0,018$
1685 ± 21	$0,058 \pm 0,012$	0.024 ± 0.015	$-0,009\pm0,015$
1634 ± 21	0.022 ± 0.013	$0,001 \pm 0,016$	$0,013\pm0,017$
1583 ± 22	$0,023\pm0,010$	$0,017\pm0,013$	$-0,007\pm0,013$
	Tensorpolarisation	bei $\theta_1 = 51^{\circ} \text{ L. S.}$	
2694 ± 15	$-0,260 \pm 0,045$	$-0,136\pm0,048$	$-0,030\pm0,050$
2644 ± 15	$-0,284 \pm 0,046$	-0.065 ± 0.049	$-0,098\pm0,049$
2592 ± 15	-0.297 ± 0.043	-0.091 ± 0.045	$-0,074\pm0,046$
2540 ± 15	$-0,263\pm0,041$	$-0,115\pm0,043$	-0.035 ± 0.044
2514 ± 14	$-0,163\pm0,043$	$-0,182\pm0,046$	$-0,024\pm0,048$
2501 ± 8	$-0,165\pm0,045$	$-0,148\pm0,049$	$0,192 \pm 0,054$
2493 ± 16	-0.089 ± 0.040	-0.191 ± 0.044	$0,028 \pm 0,048$
2476 ± 14	$-0,241\pm0,041$	-0.164 ± 0.043	$0,030 \pm 0,046$
2452 ± 16	$-0,203\pm0,031$	-0.160+0.033	$-0,008\pm0,035$
2393 ± 14	-0.152 ± 0.039	-0.031 ± 0.044	$-0,001\pm0,045$
2337 ± 20	-0.085 ± 0.039	-0.030 ± 0.046	-0.051 ± 0.046
2288 ± 19	-0.092 ± 0.038	-0.011 ± 0.044	-0.084 ± 0.043
2238 ± 19	-0.090 ± 0.039	-0.028 ± 0.045	-0.040 ± 0.045
2194 ± 13	-0.084 ± 0.043	0.020 ± 0.051	$-0,149\pm0,048$
2189 ± 18	-0.087 ± 0.044	0.014 ± 0.052	-0.007 ± 0.051
2089 ± 17	-0.061 ± 0.044	-0.034 ± 0.052	-0.142 ± 0.049
1988 ± 18	-0.057 ± 0.041	-0.040 ± 0.049	-0.076 ± 0.048
1935 ± 21	-0.100 ± 0.040	-0.008 ± 0.047	$0,002 \pm 0,047$
1884 ± 22	-0,101+0,038	-0.035 ± 0.044	-0.070 ± 0.043

Tabelle 1 (Fortsetzung)

$E_{lab} \pm \Delta E \text{ (keV)}$	t_{20}	t_{21}	t_{22}	
1835 ± 21	$-0,119\pm0,034$	$-0,062\pm0,038$	$-0,041\pm0,038$	
1811 ± 10	$-0,183\pm0,051$	-0.055 ± 0.057	-0.076 ± 0.056	
1786 ± 20	$-0,069\pm0,036$	$-0,004 \pm 0,043$	$-0,062\pm0,042$	
$1760\!\pm\!10$	-0.076 ± 0.045	$-0,009\pm0,053$	$0,074 \pm 0,054$	
1735 ± 20	-0.007 ± 0.047	$0,036 \pm 0,058$	$0,013 \pm 0,057$	
1685 ± 21	$0,017 \pm 0,035$	$0,037 \pm 0,044$	$0,059 \pm 0,044$	
1634 ± 21	$0,002 \pm 0,036$	$0,027 \pm 0,044$	-0.107 ± 0.042	
1583 ± 22	$0,053\pm0,029$	$0,053\pm0,029$ $0,000\pm0,036$		
-	Tensorpolarisation	bei $\theta_1 = 75^{\circ}$ L.S.		
2679 ± 26	$-0,146\pm0,053$	$-0,064 \pm 0,065$	$-0,197\pm0,059$	
2610 ± 26	-0.136 ± 0.050	$-0,152\pm0,062$	$-0,223\pm0,055$	
2546 ± 27	-0.181 ± 0.042	$-0,189 \pm 0,052$	$-0,209\pm0,046$	
2484 ± 24	$-0,260\pm0,049$	$-0,074 \pm 0,057$	$-0,110\pm0,054$	
2417 ± 31	$-0,330\pm0,049$	$-0,187 \pm 0,058$	$0,005 \pm 0,055$	
2389 ± 28	$-0,253\pm0,068$	$-0,095\pm0,079$	$-0,242\pm0,070$	
2379 ± 28	$-0,175\pm0,047$	-0.024 ± 0.055	$-0,081\pm0,053$	
2339 ± 28	$-0,276\pm0,058$	-0.067 ± 0.066	-0.071 ± 0.062	
2338 ± 30	$-0,066 \pm 0,043$	$0,008 \pm 0,052$	$-0,103\pm0,051$	
2284 ± 33	-0.128 ± 0.053	$0,036 \pm 0,062$	$-0,125\pm0,060$	
2278 ± 29	$-0,171\pm0,042$	$0,050 \pm 0,049$	$-0,045\pm0,049$	
2180 ± 27	$-0,101\pm0,044$	$0,033 \pm 0,053$	$0,020 \pm 0,054$	
2079 ± 28	-0.087 ± 0.039	$-0,001 \pm 0,047$	$-0,173\pm0,044$	
1975 ± 31	$-0,104\pm0,039$	$0,028 \pm 0,046$	$-0,175\pm0,044$	
1925 ± 31	-0.049 ± 0.037	-0.040 ± 0.047	$-0,086\pm0,045$	
1872 ± 34	$-0,122\pm0,035$	$-0,039 \pm 0,042$	$-0,151\pm0,040$	
1820 ± 36	$-0,176\pm0,038$	-0.064 ± 0.046	$-0,135\pm0,043$	
1769 ± 36	$-0,119\pm0,043$	$-0,049 \pm 0,052$	$-0,123\pm0,049$	
1724 ± 32	$-0,035\pm0,039$	-0.012 ± 0.048	$-0,099\pm0,046$	
$\frac{1673 \pm 32}{}$	$-0,022 \pm 0,040$	$-0,038 \pm 0,050$	$-0,103\pm0,048$	
	Tensorpolarisation	bei $\theta_1 = 105^{\circ}$ L.S.	Copy	
2679 ± 26	$-0,15\pm0,12$	$0,09 \pm 0,14$	$-0,36\pm0,12$	
2610 ± 26	-0.01 ± 0.11	-0.04 ± 0.13	$-0,34\pm0,12$	
2546 ± 27	$0,10 \pm 0,11$	$-0,13\pm0,13$	$-0,33\pm0,13$	
2484 ± 24	-0.13 ± 0.08	-0.36 ± 0.08	$-0,28 \pm 0,08$	
2417 ± 31	$-0,32\pm0,10$	-0.37 ± 0.09	$-0,01\pm0,11$	
2389 ± 28	$-0,44 \pm 0,16$	$-0,42 \pm 0,13$	$-0,37\pm0,13$	
2379 ± 28	$-0,10\pm0,09$	-0.33 ± 0.09	$-0,42\pm0,09$	
2339 ± 28	$-0,38 \pm 0,13$	-0.32 ± 0.12	$-0,25\pm0,12$	
2338 ± 30	$-0,55\pm0,12$	$-0,13\pm0,12$	-0.08 ± 0.12	
2284 ± 33	$-0,48 \pm 0,13$	$-0,22 \pm 0,12$	$-0,12\pm0,12$	
2278 ± 29	$-0,19\pm0,12$	$-0,36 \pm 0,12$	$-0,07\pm0,13$	
2180 ± 27	$-0,18 \pm 0,11$	-0.09 ± 0.12	$-0,24\pm0,10$	
2079 ± 28	-0.01 ± 0.08	$0,00 \pm 0,10$	$-0,15\pm0,09$	
1975 ± 31	$-0,14 \pm 0,08$	$0,04 \pm 0,10$	$-0,19\pm0,09$	
1925 ± 31	$-0,10 \pm 0,08$	-0.05 ± 0.09	$-0,24\pm0,09$	
1872 ± 34	-0.07 ± 0.07	$0,02 \pm 0,08$	$-0,23 \pm 0,07$	
1820 ± 36	$-0,10 \pm 0,08$	-0.05 ± 0.09	$-0,28 \pm 0,08$	
1769 ± 36	$-0,14\pm0,09$	$-0,11\pm0,10$	$-0,19\pm0,10$	
1724 ± 32	$0,04 \pm 0,08$	-0.03 ± 0.10	-0.30 ± 0.09	
1673 ± 32	$0,19 \pm 0,10$	$-0,18\pm0,12$	$-0,29\pm0,12$	

Angesichts dieser Schwierigkeiten haben wir in unserer Analyse versucht, vor allem die resonanzbedingte Energieabhängigkeit unserer Daten zu reproduzieren. Ausgangspunkt ist ein postulierter Satz von Niveauparametern. Über die daraus konstruierte Resonanzphase rechnen wir in «Vorwärtsrichtung» das Energieverhalten der Messwerte in der Nähe der Resonanzenergie und vergleichen mit den experimentellen Werten. Dabei folgen wir einem Formalismus, wie er z. B. von McIntyre und Haeberli [11] beschrieben wird; zudem haben wir Teile des dort erwähnten Computerprogrammes «SPIN 1» übernommen.

Um den nicht resonanten Hintergrund zu berücksichtigen, ist ein Satz von linear von der Energie abhängigen «Hintergrundsphasen» $\delta^j(E)$ angenommen worden. Dieser ist so gewählt worden, dass er bei genügender Entfernung von der Resonanzenergie (etwa 2 Resonanzbreiten) die experimentellen Daten möglichst gut wiedergibt. Wenn J^{π} Spin und Parität des Zwischenkernniveaus und l_0 der (im Falle mehrerer Möglichkeiten bevorzugte) Bahndrehimpuls im elastischen Kanal bedeuten (postulierte Werte), so wird der Hintergrundsphase $\delta^J_{l_0}$, die dem betrachteten Zwischenkernniveau entspricht, Resonanzverhalten überlagert. Der Verlauf der resonanten Phase δ_R im Gebiet der Resonanz folgt aus Lane und Thomas ([18], p. 322, (1.12))²)

$$e^{2i\delta_R} = e^{2i\phi} \left(1 + \frac{\Gamma_d}{\Gamma_{tot}} \left(e^{2i\beta} - 1 \right) \right) \tag{5}$$

mit

$$tg \beta = \frac{\frac{1}{2} \Gamma_{tot}}{E_{\lambda} + \Delta_{\lambda}(E) - E}. \tag{6}$$

Dabei ist vorausgesetzt, dass die Hintergrundsphase ϕ reines «hard-sphere»-Verhalten zeigt. Obwohl die oben beschriebene, phänomenologisch richtige Hintergrundsphase $\delta^J_{l_0}$ dieser Bedingung nicht genügt, haben wir im Rahmen unserer qualitativen Untersuchungen an Stelle von ϕ dieselbe eingesetzt:

$$\phi = \delta^J_{l_0}$$
.

Ferner bedeutet in (6) Γ_d die elastische Niveaubreite und $\Gamma_{tot} = \Gamma_d + \Gamma_p + \Gamma_n + \cdots$ die totale Breite der Resonanz. E ist die Energie des einfallenden Teilchens, E_{λ} die sogenannte charakteristische Energie und $\Delta_{\lambda}(E)$ die (energieabhängige) Thomas-Verschiebung. Entwickelt man den Nenner von (6) in der Gegend der Resonanzenergie E_R , so erhält man für $\operatorname{tg}\beta$ ([8], XII, 3a):

$$\operatorname{tg}\beta \approx \frac{\frac{1}{2}\Gamma_{tot}}{(E_R - E)\left(1 - \frac{d\Delta_{\lambda}}{dE}\Big|_{E = E_R}\right)} \approx \frac{\frac{1}{2}\Gamma_{tot}}{E_R - E}.$$
(7)

$$e^{2i\beta}-1\equiv rac{2\,i\,\mathrm{tg}eta}{1-i\,\mathrm{tg}eta}$$
 .

²⁾ Bei der Herleitung von (5) ist zu beachten, dass

Die Abschätzung von $d\Delta_{\lambda}/dE$ zeigt, dass die Approximation (7) im ganzen betrachteten Energiegebiet erlaubt ist $(d\Delta_{\lambda}/dE < 0.05 \text{ für } 1.6 \text{ MeV} < E < 2.7 \text{ MeV})$.

Mit dem Phasensatz $\delta_l^j(l,j \neq l_0,J)$ und δ_R kann man nun das theoretische Energieverhalten der gemessenen Grössen $(t_{2k}(\theta_1), d\sigma/d\Omega(\theta_1))$ berechnen und mit den Messwerten vergleichen.

5.2. Ergebnisse

Die beschriebene Rechnung ist für die 2,50-MeV-Resonanz durchgeführt worden. Wir haben dabei komplexe S-, P-, D- und F-Phasen ($l_{max} = 3$) berücksichtigt. Die gefundenen Hintergrundsphasen sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 Hintergrundsphasen für $E=2.5~{\rm MeV}$. Die in Klammern angegebenen Werte bedeuten die Änderung der Phasen mit der Energie in grad/100 keV.

ı		j = l + 1		j = l		j = l - 1	
0	Real. Imag.	-8,1° 2,5°	(-1,9°) (2,9°)				8
ì	Real.	-6,1°	(-8,3°)	3,0°	(1,0°)	-36,8°	(10,5°)
	Imag.	0,2°	(0,2°)	10,1°	(0,1°)	1,2°	(-1,5°)
2	Real.	-2,9°	(-7,5°)	15,5°	(1,1°)	6,2°	(-1,2°)
	Imag.	1,1°	(-0,7°)	5,1°	(3,9°)	8,0°	(5,3°)
3	Real.	-3,7°	(6,3°)	-0,5°	(0,4°)	-3,6°	(4,0°)
	Imag.	1,3°	(-1,7°)	2,1°	(-0,7°)	0,0°	(0,0°)

Die Niveauparameter, die der Rechnung zugrunde gelegt worden sind, lauten nach [5]:

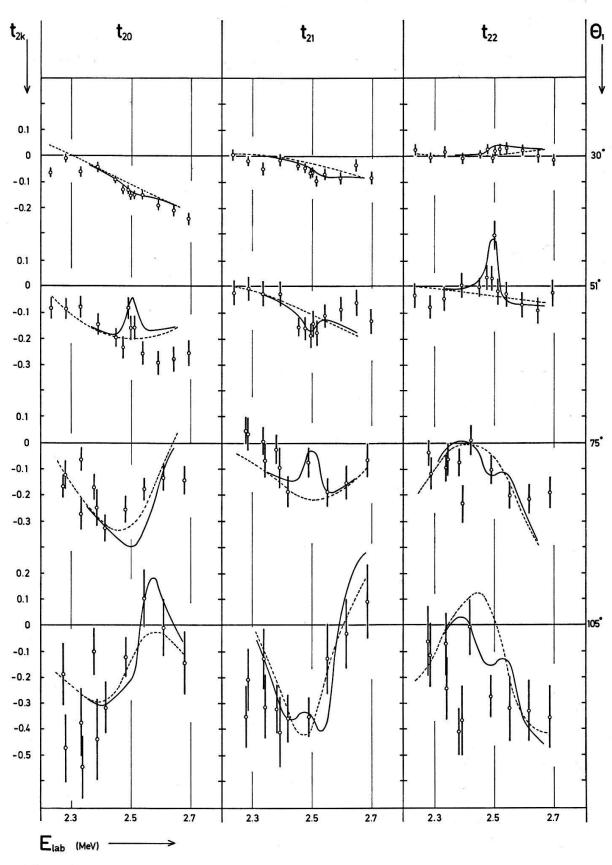
$$J^{\pi} = 4^{-}$$
 $\Gamma_{tot} = 45 \text{ keV}$
$$\frac{\Gamma_d}{\Gamma_{tot}} = 0,55$$
 $l_0 = 3$. (9)

In Figur 4 sind die gemessenen Tensormomente t_{2k} in der Gegend der 2,5-MeV-Resonanz als Funktion der Energie dargestellt. Die punktierten Kurven zeigen die mit den Hintergrundsphasen allein gerechneten Werte. Diese gehen durch Überlagern des Resonanzverhaltens in die durchgezogenen Kurven über.

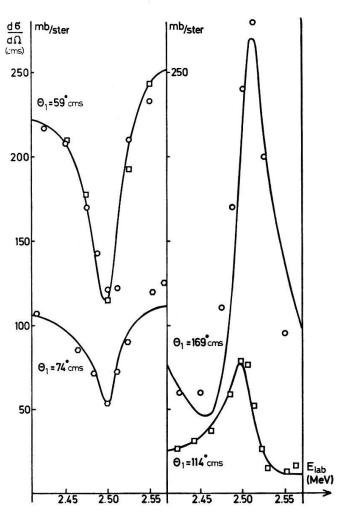
Einige der gerechneten absoluten differentiellen Wirkungsquerschnitte sind in Figur 5 mit Daten aus der Literatur, sowie eigenen Messungen von Anregungskurven verglichen (siehe Abschnitt 4.1).

In Figur 6 sind die gemessenen Tensormomente t_{2k} als Funktion der Energie in der Gegend der 1,8-MeV-Resonanz dargestellt. Erfolgreiche Rechnungen liegen bei diesem Niveau nicht vor.

Die numerischen Rechnungen sind auf der UNIVAC 1108 der Firma SANDOZ AG durchgeführt worden.



Figur 4 Die gemessenen Tensormomente t_{2k} in der Gegend der 2,5-MeV-Resonanz bei 30°, 51°, 75° und 105° L.S. Die eingezeichneten Kurven zeigen die aus den Hintergrundsphasen allein berechneten Werte (punktiert) sowie das Energieverhalten mit überlagerter Resonanz (ausgezogene Kurve).



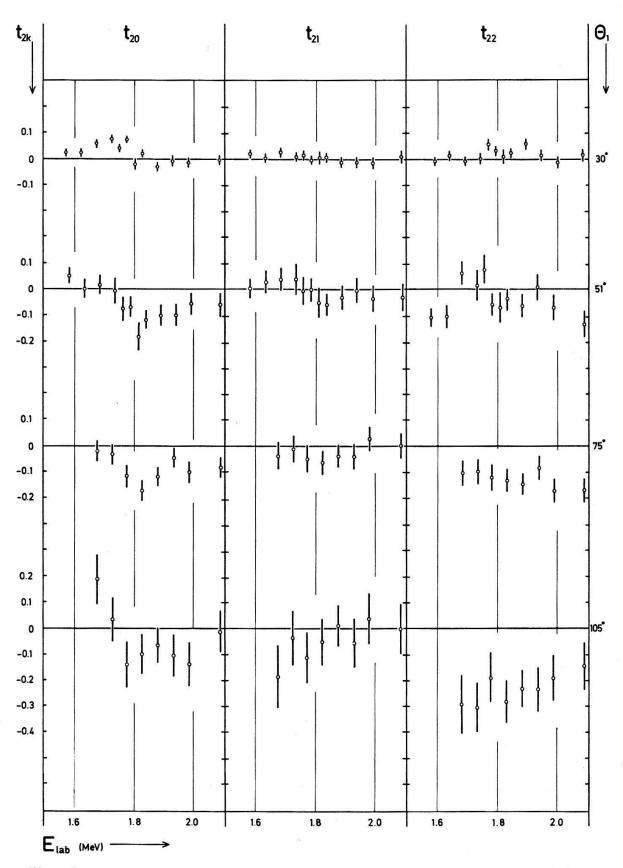
Figur 5 Absolute differentielle Wirkungsquerschnitte für 12 C $(d,d)^{12}$ C. Die durchgezogenen Kurven sind die aus der Resonanzparameteranalyse erhaltenen Werte. Die eingezeichneten Punkte sind von folgenden Autoren gemessen:

- O McEllistrem et al. [ME] (absolute Querschnitte)

6. Diskussion

Anstelle je eines vollständigen Satzes komplexer Phasen bei genügend vielen diskreten Energien im Gebiet der untersuchten Resonanz treten in der im vorigen Abschnitt beschriebenen Resonanzparameteranalyse als variierbare Parameter neben den linearen Hintergrundsphasen lediglich die entsprechenden Niveauparameter auf. Die Fluktuationen im Energieverlauf der Tensormomente, die vom Auftreten einer Resonanz herrühren, hängen in Vorzeichen und Grösse überraschend wenig von der Wahl der Hintergrundsphasen ab, sind jedoch sehr empfindlich auf die Resonanzparameter J^{π} und Γ_d/Γ_{tot} .

Da anderseits der Wirkungsquerschnitt $\sigma(\theta_1, E)$ im Gegensatz zu den Tensormomenten $t_{ik}(\theta_1)$ eine Funktion der Beträge aller Streuamplituden ist [11], sind die t_{ik} auf die Eigenschaften des Zwischenkernniveaus viel empfindlicher als $\sigma(\theta_1, E)$. Ein



Figur 6 Die gemessenen Tensormomente t_{2k} in der Gegend der 1,8-MeV-Resonanz bei 30°, 51°, 75° und 105° L.S.

Beispiel für diesen Sachverhalt ist die weiter unten erwähnte, erfolglose Analyse der 1,79-MeV-Resonanz, wo eine gute Darstellung der $d\sigma/d\Omega(\theta_1)$ vorliegt, jedoch keine Übereinstimmung in den t_{2k} gefunden worden ist.

Man kann somit sagen, dass auch eine nur qualitative Übereinstimmung der gerechneten Werte mit den experimentellen Polarisationsdaten als starke Bestätigung der zugrunde gelegten Niveauparameter gewertet werden muss. Die in (9) angegebenen, bereits bekannten [5] Werte der Niveauparameter des 12,41-MeV-Niveaus in ¹⁴N sind somit auch durch Polarisationsmessungen erhärtet worden.

Den Hintergrundsphasen kommt dabei untergeordnete Bedeutung zu. Sie sollen phänomenologisch die Hintergrundspolarisation am Ort der Resonanz erzwingen. Immerhin kann festgestellt werden, dass dies im Fall der in Abschnitt 5.2 behandelten 2,50-MeV-Resonanz nur durch zum Teil stark energieabhängige Phasen möglich gewesen ist. Dies lässt sich durch Interferenzeinflüsse benachbarter Niveaus erklären. So kann z. B. der hervorstechende Wert der P-Phase für j=0 bei 2,5 MeV (siehe Tabelle 2) die Anwesenheit eines 0--Niveaus in 14 N bei etwa 12,4 MeV Anregungsenergie bedeuten.

Überlappen benachbarte Niveaus im Zwischenkern zu stark, können die Interferenzeffekte nicht mehr als Störung interpretiert werden, welche durch entsprechende Wahl der Hintergrundsphasen berücksichtigt wird, sondern es müssen die einzelnen Resonanzen gleichberechtigt behandelt werden. Diese Verhältnisse gelten für die zweite von uns untersuchte Resonanz ($E_R = 1,79 \text{ MeV}$).

Wir haben versucht, durch Erweiterung der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Methode auf drei interferierende Niveaus auch diese Resonanz zu analysieren. Einerseits hat man nun aber wieder eine grosse Anzahl Anpassungsparameter, anderseits weisen die mit drei Niveaus gerechneten t_{2k} eine Reihe schmaler Energiefluktuationen auf. Um schlüssige Ergebnisse zu erhalten, wäre es demnach nötig, in dem betreffenden Energiegebiet Polarisationsmessungen mit einer besseren Energieauflösung auszuführen. Ebenso wäre es wünschenswert, Absolutmessungen von differentiellen Wirkungsquerschnitten bei mehr Streuwinkeln und lückenlos von 1,5 MeV bis 3 MeV zu besitzen.

Herrn Dr. G. R. Plattner möchten wir für viele wertvolle Hinweise beim Verfassen vorliegender Arbeit danken, ebenso den Herren F. Abt, P. Brogle und H. Weyeneth für ihre Hilfe bei technischen Problemen. Der Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung hat die Arbeit finanziell unterstützt.

LITERATUR

- [1] H. Cords et al., Nucl. Phys. A 113, 608 (1968).
- [2] H. Paetz gen. Schieck et al., Bull. Am. Phys. Soc. 14, 507 (1969).
- [3] F. AJZENBERG-SELOVE, Nucl. Phys. A 152, 51 (1970).
- [4] M. T. McEllistrem et al., Phys. Rev. 104, 1008 (1956).
- [5] M. T. McEllistrem, Phys. Rev. 111, 596 (1958).
- [6] E. Kashy, P. R. Perry und J. R. Risser, Phys. Rev. 117, 1289 (1960).
- [7] M. LAMBERT et al., Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris) 262 B, 1459, 1547 (1966).
- [8] T. S. KATMAN et al., Nucl. Phys. 80, 449 (1966).
- [9] J. M. F. Jeronimo et al., Nucl. Phys. 43, 417 (1963).
- [10] L. Brown, H. Christ und H. Rudin, Nucl. Phys. 79, 459 (1966).
- [11] L. C. McIntyre und W. Haeberli, Nucl. Phys. A 91, 396, 382 (1967).

- [12] Madison Conference on Polarization Phenomena, Madison 1970.
- [13] H. MEINER et al., Helv. phys. Acta 40, 483 (1967).
- [14] G. R. PLATTNER et al., Helv. phys. Acta 40, 465 (1967).
- [15] L. YAFFE, Ann. Rev. Nucl. Sci. 12, 153 (1962).
- [16] S. H. MAXMAN, Nucl. Instr. Meth. 50, 53 (1967).
- [17] H. PAETZ gen. Schieck, The Ohio State University, private Mitteilung.
- [18] A. M. LANE und R. G. THOMAS, Rev. mod. Phys. 30, 257 (1958).