

# Die Winkelverteilung und Ausbeute von Kernphotoprotonen zwischen 20 und 60 MeV aus Be, C, Cu und Pb bei 150 MeV $\gamma$ -Strahlenergie\*.

Von

H. HENDEL.

Mit 5 Figuren im Text.

(Eingegangen am 2. März 1953.)

In der vorliegenden Arbeit wurde der Kernphotoeffekt an Be, C, Cu und Pb bei 150 MeV Maximalenergie des  $\gamma$ -Strahles untersucht. Zusammenfassend ergeben sich folgende Resultate:

1. Die Winkelverteilungskurven der Photoprotonen zwischen 20 und 60 MeV steigen vom Meßwert für  $125^\circ$  kontinuierlich an und erreichen bei etwa  $45^\circ$  einen maximalen Wert, um dann für kleine Winkel zwischen  $\gamma$ -Strahl und Protonenaustrittsrichtung wieder langsamer abzufallen.
2. Der Anstieg der Winkelverteilungskurven vom Wert für  $90^\circ$  zum Maximalwert ist für 50 MeV-Protonen etwa 1,5mal so groß wie für 30 MeV-Protonen. Ebenso ist der Abfall vom Meßwert für  $90^\circ$  zu dem für  $125^\circ$  etwa 2mal so stark für die schnellen Protonen, welche also bevorzugt in  $\gamma$ -Strahlrichtung emittiert werden.
3. Das Maximum der Winkelverteilungskurve verschiebt sich mit wachsender Protonenenergie in Richtung kleinerer Austrittswinkel.
4. Während die Winkelverteilung der Photoprotonen für Be, C und Cu sehr ähnlich ist, wurde für das schwere Pb eine isotropere Winkelverteilung gefunden.
5. Der Wirkungsquerschnitt für 30- und 50 MeV-Protonen ist proportional zu Z.

## I. Einführung.

Kernphotoreaktionen sind seit 1934 bekannt. In diesem Jahre entdeckten SZILARD und CHALMERS<sup>1</sup> die Kernumwandlung  $\text{Be}^9(\gamma, n)\text{Be}^8$ . CHADWICK und GOLDHABER<sup>2</sup> untersuchten diese Reaktion sorgfältiger und fanden weiter die Deuteronen-Photoreaktion  $\text{H}^2(\gamma, n)\text{H}^1$ . Beide Umwandlungen wurden hervorgerufen von den 2,62 MeV- $\gamma$ -Strahlen des  $\text{ThC}''$ . Die 17,6 MeV- $\gamma$ -Strahlung der Reaktion  $\text{Li}^7(p, \gamma)\text{Be}^8$  ermöglichte die Untersuchung der Kernphotoreaktionen an den übrigen Elementen, welche eine größere Energiezufuhr benötigen. Es zeigte sich, daß außer Neutronen auch Protonen, Deuteronen und  $\alpha$ -Teilchen in Kernphotoreaktionen frei werden. Die Winkelverteilung dieser sekundären Reaktionsprodukte steht bei geringen  $\gamma$ -Strahlenergien (bis etwa 20 MeV) in Übereinstimmung mit der aus dem Zwischenkernmodell berechneten isotropen Winkelverteilung. (Der Zwischenkern unter-

\* Auszug aus der Münchener Dissertation des Verfassers.

<sup>1</sup> SZILARD, L., u. T. A. CHALMERS: Nature, Lond. **134**, 494 (1934).

<sup>2</sup> CHADWICK, J., u. M. GOLDHABER: Proc. Roy. Soc. Lond. **151**, 479 (1935).

scheidet sich in diesem Falle nur durch den Anregungszustand vom ursprünglichen Kern.) Ebenso deutet die Energieverteilung der ausgesandten Neutronen und Protonen auf die Bildung eines Zwischenkernes hin. Das Verhältnis von Neutronen- zu Protonenausbeute stimmt für Cu bei 24 MeV-Bremsstrahlung nach den Messungen von BYERLY und STEPHENS<sup>1</sup> überein mit den Ergebnissen einer Berechnung von WEISSKOPF und EWING<sup>2</sup>, welche auf dem Zwischenkernmodell beruht. HIRZEL und WÄFFLER<sup>3</sup> fanden für das Verhältnis von Protonen- zu Neutronenausbeute für 17,6 MeV- $\gamma$ -Strahlung ein Ergebnis, das nicht mit der Bildung eines Zwischenkernes zu vereinbaren ist.

In den letzten zwei Jahren wurde schließlich die Winkel- und Energieverteilung schneller Photoprotonen aus Reaktionen im Bremsstrahlungsspektrum von über 100 MeV Maximalenergie gemessen. Winkel- und Energieverteilung dieser Protonen stehen im Gegensatz zu den Voraussetzungen auf Grund eines Zwischenkernmodells, da eine anisotrope Winkelverteilung gefunden wurde und Protonen mit Energien, die etwa gleich der halben  $\gamma$ -Strahlmaximalenergie sind, relativ häufig vorkommen. Experimente dieser Art sind insbesondere von LEVINTHAL und SILVERMAN<sup>4</sup>, WALKER<sup>5</sup>, KIKUCHI<sup>6</sup> und KECK<sup>7</sup> ausgeführt worden. LEVINTHAL und SILVERMAN untersuchten mit Proportionalzählrohren die Winkelverteilung der Protonen. Sie fanden für 10 MeV-Protonen isotrope Verteilung, für 40 MeV-Protonen Zunahme des differentiellen Wirkungsquerschnittes in  $\gamma$ -Strahlrichtung. Die Messungen der beiden Autoren reichen nur bis zu Winkeln von 45° (zwischen  $\gamma$ -Strahl- und Protonenaustrittsrichtung). Der Wirkungsquerschnitt für 90° zum  $\gamma$ -Strahl ergibt sich proportional zu  $Z$ . WALKER beobachtete ( $\gamma$ , p)-Reaktionen an C bei 195 MeV  $\gamma$ -Strahlmaximalenergie. Nach seinen Messungen nimmt die Ausbeute an Protonen mit abnehmendem Winkel zwischen  $\gamma$ -Strahl und Protonen-Emissionsrichtung zu. KIKUCHI arbeitete mit  $\gamma$ -Strahlenergien zwischen 150 und 300 MeV, d. h., er beschäftigte sich hauptsächlich mit den Vorgängen oberhalb des Schwellenwertes für die Mesonenerzeugung. Seine Winkelverteilungskurve zeigt ein Maximum bei ungefähr 45° und fällt für kleine Winkel zwischen  $\gamma$ -Strahl- und Protonenaustrittsrichtung wieder ab, während WALKER kein Maximum fand. Die Atome, an welchen die Photoreaktion hervorgerufen wird, sind bei den Untersuchungen KIKUCHI's die Atome der photographischen Emulsion. Daher sind diese Messungen mehr qualitativer als quantitativer

<sup>1</sup> BYERLY, P. R., u. W. E. STEPHENS: Phys. Rev. **81**, 473 (1951).

<sup>2</sup> WEISSKOPF, V., u. D. H. EWING: Phys. Rev. **57**, 472 (1940).

<sup>3</sup> HIRZEL, O., u. H. WÄFFLER: Helv. phys. Acta **20**, 373 (1947).

<sup>4</sup> LEVINTHAL, C., u. A. SILVERMAN: Phys. Rev. **82**, 822 (1951).

<sup>5</sup> WALKER, D.: Phys. Rev. **81**, 634 (1951); **84**, 149 (1951).

<sup>6</sup> KIKUCHI, S.: Phys. Rev. **86**, 41 (1952).

<sup>7</sup> KECK, J. C.: Phys. Rev. **85**, 410 (1952).

Art, da erst die Kenntnis der relativen Wirkungsquerschnitte und der relativen Winkelverteilung für alle in der photographischen Schicht vorkommenden Atome die Zuordnung dieser Meßwerte zu einer bestimmten Atomart ermöglichen würde. KECK untersuchte mit Szintillationszählern ( $\gamma$ , p)-Reaktionen im Protonenenergiebereich von 100 bis 200 MeV. Er fand für 100 MeV-Protonen ein Maximum der Winkelverteilungskurve bei etwa  $45^\circ$ . Der Wirkungsquerschnitt für 130 MeV-Protonen ist, nach KECKs Messungen, proportional zu  $Z$ . Eine ausführliche Literaturübersicht der Photoreaktionen an schweren Elementen befindet sich in der zusammenfassenden Arbeit von EYGES<sup>1</sup>.

Die geringe Anzahl experimenteller Arbeiten über den Kernphotoeffekt ließen es wünschenswert erscheinen, Kernphotoeffekte bei mittleren Energien, also unterhalb des Mesonenschwellenwertes, an leichten, mittleren und schweren Elementen zu untersuchen. Insbesondere sollte der Verlauf der Winkelverteilungskurve der sekundären Reaktionsprodukte gemessen werden, um die Frage nach dem Auftreten eines Maximums (bei etwa  $45^\circ$ ) beantworten zu können.

## II. Versuchsanordnung.

Zur Untersuchung des Kernphotoeffektes, d.h. der Winkel- und Energieverteilung derjenigen Teilchen, die von den Atomkernen eines mit  $\gamma$ -Strahlung beschossenen Elementes ausgesandt werden, sind mehrere Versuchsanordnungen möglich. Die einfachste Anordnung ruft die Kernphotoreaktion an solchen Atomen hervor, die normalerweise schon im Nachweisgerät vorhanden sind, z. B. an den C-Atomen in der Gelatine der photographischen Emulsion oder den H<sup>2</sup>- oder N-Atomen in der Füllung einer WILSON-Kammer. Kernemulsion oder WILSON-Kammer werden der  $\gamma$ -Strahlung ausgesetzt; die Reaktion findet in der Schicht oder der Kammerfüllung statt, und wird hier auch registriert. Eine zweite Methode ist die, eine Platte des zu untersuchenden Elementes in den  $\gamma$ -Strahl zu bringen und die aus dieser dünnen Platte austretenden sekundären Partikel in Nachweisgeräten aufzufangen, welche im Halbkreis unter verschiedenen Winkeln um diese Platte, dem sog. „Target“ (dem Ziel des  $\gamma$ -Strahls), angeordnet werden. Als Nachweisgeräte dienen entweder die verschiedenen elektrischen Proportionalzähler oder die photographische Emulsion. Die bei der ersten Methode auftretenden Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Austrittswinkels der Partikel, d.h. des Winkels zwischen der Flugrichtung des neuentstandenen Reaktionsproduktes und dem primären  $\gamma$ -Strahl, sind bei außerhalb des Targets angeordnetem Nachweisgerät nicht vorhanden, da auf Kosten der Ausbeute und unter Verlust der energiearmen Teilchen

<sup>1</sup> EYGES, L.: Phys. Rev. 86, 325 (1952).

eine fast beliebig genaue Festlegung der Winkel möglich ist. Im Gegensatz hierzu gibt jedoch die erste Anordnung auch Partikel geringer Energie wieder, welche bei außerhalb des Targets aufgestellten Nachweisinstrumenten in dem Absorber zwischen Target und Nachweisgerät durch Absorption der Messung entzogen werden können. Der Vollständigkeit halber sei eine weitere, dritte Methode erwähnt. Setzt man ein völlig reines Element, besser noch ein Isotop, längere Zeit einem starken  $\gamma$ -Strahl aus, so lassen sich durch analytische Verfahren die Mengen der in dem anfänglich reinen Element durch Kernphotoeffekt entstandene Elemente bestimmen.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine etwa 1 mm starke Platte des zu untersuchenden Elementes dem  $\gamma$ -Strahl des Elektronensynchrotrons des Massachusetts Institute of Technology ausgesetzt. In diesem dünnen Target finden Kernreaktionen  $A_z^a(\gamma, n) B_z^{a-1}$ ,  $A_z^a(\gamma, p) B_z^{a-1}$  usw. statt, deren sekundäre Reaktionsprodukte in Kodak-N.T.B.-Kernplatten (200  $\mu$ ) aufgefangen wurden, welche in einem Kreis mit dem Target als Mittelpunkt aufgestellt waren. Aus Korndichte und Reichweite der so erhaltenen Partikelspuren wurden Art<sup>1</sup> und Energie<sup>2</sup> der sekundären Teilchen bestimmt. Die Gesamtenergie der Teilchen, die als Protonen identifiziert wurden, ergab sich durch Addition der Energieverluste im Target, im Luftzwischenraum zwischen Target und Kernplatte und in der Lichtschuttschicht der Photoplatte zu der der gefundenen Spurlänge des Protons entsprechenden Energie. Die Winkelverteilung der in den Kernphotoreaktionen entstandenen Protonen erhält man aus der Anzahl der Spuren in den unter verschiedenen Winkeln aufgestellten Photoemulsionen. Zu diesem Zweck wurden für jedes Element insgesamt etwa 200 Spuren ausgemessen. Zur Untersuchung der Energieabhängigkeit der Winkelverteilung wurden die Protonen in zwei Energiebereiche von 20 bis 40 MeV und von 40 bis 60 MeV eingeteilt. Im folgenden wurden Protonen des ersteren Bereiches kurz als 30 MeV-Protonen, die des zweiten als 50 MeV-Protonen bezeichnet, da vorausgesetzt werden kann, daß innerhalb dieser Energiebereiche keine sprunghafte Änderung der Winkelverteilung stattfindet.

Zur Berechnung des Wirkungsquerschnittes benötigt man eine Maßzahl für die auf das Target auffallende Strahlungsintensität. Zur Angabe der Intensität des Synchrotron-Bremsspektrums wird eine „Äquivalente Quantenzahl“  $Q$  definiert als

$$Q = \frac{\text{Totaler Energiefluß im } \gamma\text{-Strahl}}{\text{Maximale Energie der Elektronen im Synchrotron}}$$

<sup>1</sup> LATTES, C. M. G., G. P. S. OCCHIALINI u. C. F. POWELL: Nature, Lond. **160** 486 (1947).

<sup>2</sup> LATTES, C. M. G., G. P. S. OCCHIALINI u. C. F. POWELL: Proc. Phys. Soc. Lond. **61**, 173 (1948).

Der Energiefluß im  $\gamma$ -Strahl wurde mit einer Victoreen-Fingerhutkammer gemessen. Der differentielle Wirkungsquerschnitt  $dq/d\Omega$  in Abhängigkeit von  $dn/d\Omega$ , der Zahl der pro Raumwinkeleinheit austretenden sekundären Protonen, ergibt sich damit zu

$$dq/d\Omega = \frac{A}{Q x N_0 d} \cdot dn/d\Omega.$$

Es bedeuten  $A$  das Atomgewicht,  $x$  die Targetstärke,  $N_0$  die LOSCHMIDTSCHE Zahl und  $d$  die Dichte des Targets.

### III. Ergebnisse und ihre Deutung.

#### 1. Die Form der Winkelverteilungskurve.

Alle Winkelverteilungskurven der Photoprotonen steigen vom Meßwert für  $125^\circ$  kontinuierlich an, durchlaufen einen Wendepunkt und erreichen bei  $40$  bis  $45^\circ$  den maximalen Wert, um dann wieder etwas langsamer abzufallen (vgl. Fig. 1, 4 und 5).

Diese Form der Winkelverteilungskurve erlaubt es nun, Schlüsse zu ziehen auf den Mechanismus der Aufnahme eines energiereichen Photons in den Kern mit darauffolgender Emission eines schnellen Protons. Zwei Wege zur Erklärung dieser Reaktion sind naheliegend: 1. Aufnahme des Photons in den Kern, Verteilung der Energie des Photons auf alle Nukleonen im Kern unter Bildung eines angeregten Zwischenkernes von kurzer Lebensdauer und anschließende Abgabe eines Protons, falls sich zufällig eine genügend große Energie auf einem Proton angesammelt haben sollte. 2. Direkte Wechselwirkung des Photons mit einem Proton des Kerns.

Da das erstgenannte Zwischenkernmodell eine isotrope Winkelverteilung ergeben würde (gleiche Wahrscheinlichkeit für jedes Nukleon, einen Energieüberschuß zu erlangen), kommt es für die Erklärung der hier vorliegenden Winkelverteilung nicht in Frage. Mit Annahme einer direkten Wechselwirkung führte LEVINGER<sup>1</sup> Rechnungen durch für ein Modell, das in der Mitte liegt zwischen dem Zwischenkernmodell und einem Modell, in dem die Nukleonen des Kerns keine Wirkung aufeinander ausüben. Dieses sog. Deuteronenmodell besteht aus je einem, nahe beieinanderliegenden Neutron und Proton, während alle anderen Nukleonen des Kerns sich paarweise in großem Abstand befinden. Die hier vorliegenden Messungen zeigen nun keine sehr gute Übereinstimmung mit LEVINGERS Theorie. Die Lage des Maximums ergibt sich experimentell bei kleineren Winkeln, als aus dieser Theorie hervorgeht. Der Anstieg der Kurve vor dem Maximum ist geringer als nach LEVINGERS Rechnungen, die einen etwa symmetrischen Verlauf der Winkelverteilungskurve in bezug auf das Maximum ergeben. Da WALKER nur

<sup>1</sup> LEVINGER, J. S.: Phys. Rev. **84**, 43 (1951).

sehr wenig Meßpunkte angibt und LEVINTHAL und SILVERMAN bei  $45^\circ$  aufhörten zu messen, kann dieses Ergebnis nur mit der Winkelverteilung von KIKUCHI verglichen werden. Die Lage des Maximums in KIKUCHI'S Kurve stimmt mit der hier gefundenen überein.

### 2. Abhängigkeit der Winkelverteilung von der Protonenenergie.

Bei der Betrachtung der Winkelverteilungskurve entsteht die Frage, ob sich ein Zusammenhang zwischen der Steigung dieser Kurve und der Protonenenergie aufzeigen läßt. Berechnet man für die vier untersuchten Elemente das Verhältnis des Wirkungsquerschnittes für den Maximalwert bei etwa  $45^\circ$  zu dem Wert bei  $90^\circ$ , und ebenso das Verhältnis Maximalwert zu dem Wert bei  $125^\circ$ , so ergibt sich folgendes:

MeV	$q_{\max}/q_{90^\circ}$		$q_{\max}/q_{125^\circ}$	
	Be, C, Cu	Pb	Be, C, Cu	Pb
30	1,8	1,5	5,8	2,1
50	2,5	2,3	18	6

Der Anstieg vom Wirkungsquerschnitt für  $90^\circ$  zum Maximalwert ist also für die schnellen Protonen etwa 1,5mal so groß wie für die langsamen. Ebenso ist der Abfall vom Meßwert für  $90^\circ$  zu dem für  $125^\circ$  etwa 2mal so stark für die schnellen Protonen. Diese Zusammenhänge sind in der Fig. 1 graphisch dargestellt.

### 3. Abhängigkeit der Winkelverteilung von $Z$ .

Die folgende Fig. 1 zeigt die Winkelverteilungskurven (normiert auf 1 für  $90^\circ$ ) für die beiden Energiegruppen der vier untersuchten Elemente. Nach dieser Darstellung ist sowohl für die schnellen als auch die langsamen Protonen die Winkelverteilung des Elementes Pb isotroper als die von Be, C und Cu. Die Erklärung dieses Effektes dürfte folgende sein: In einem sehr großen Atom wird es häufig vorkommen, daß ein durch ein Photon innerhalb des Atomkerns angestoßenes, schnelles Proton in diesem Kern an anderen Nukleonen gestreut wird, und daher den Kern nicht in seiner ursprünglichen Richtung verläßt. Die Wirkung dieser Streuung ist eine mehr isotrope Verteilung der austretenden Protonen.

### 4. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von $Z$ .

Die gemessenen Wirkungsquerschnitte für  $90^\circ$  sind in folgender Fig. 2 aufgetragen gegen die Kernladung  $Z$ . Wie zu erwarten, ergibt sich annähernd Proportionalität zwischen  $q_{90^\circ}$  und  $Z$ , d. h., der Wirkungsquerschnitt für die Emission schneller Protonen steigt mit wachsender

Anzahl der Protonen im Kern. Die Steigung der Geraden ist bei logarithmischer Darstellung 0,98 für 30 MeV-Protonen und 0,90 für 50 MeV-Protonen. LEVINTHAL und SILVERMAN fanden für die gleiche Kurve eine Steigung von 0,91 für 40 MeV-Protonen. Die hier gefundenen absoluten

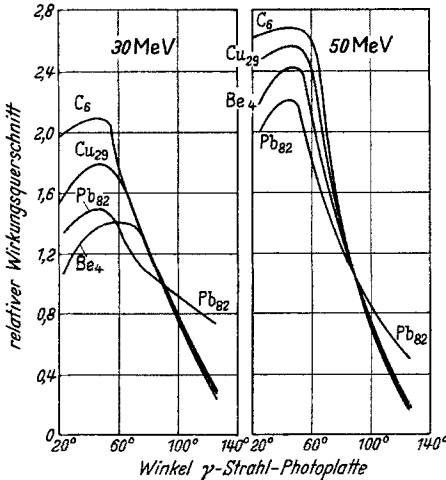


Fig. 1. Abhängigkeit der Winkelverteilung der Photoprotonen von Z.

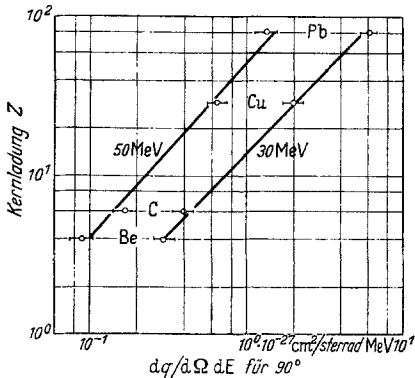


Fig. 2. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes bei 90° von Z.

Wirkungsquerschnittswerte müssen mit 1,35 multipliziert werden, um den Werten LEVINTHALs und SILVERMANs zu entsprechen.

5. Vergleich der gemessenen Winkelverteilungskurven mit denen anderer Autoren.

Eine Betrachtung der hier gefundenen Winkelverteilungskurven legt die Frage nach der Form dieser

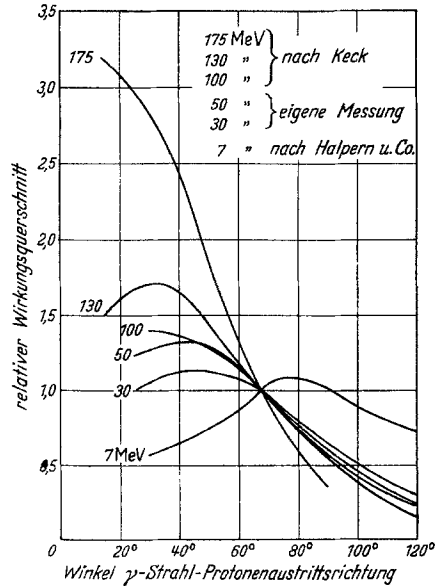


Fig. 3. Vergleich der gemessenen Winkelverteilungskurven mit denen anderer Autoren.

Kurven bei anderen Energien der Protonen nahe. In der Fig. 3 sind deshalb die Winkelverteilungskurven für Photoprotonen von 175, 130 und 100 MeV nach KECK und die Kurven für Protonen von etwa 7 MeV nach den Messungen von HALPERN, MANN und ROTHMAN<sup>1</sup> mit den eigenen Kurven für 30 und 50 MeV verglichen. Zu diesem Zweck sind alle

<sup>1</sup> HALPERN, I., A. K. MANN u. M. ROTHMAN: Phys. Rev. **87**, 164 (1952).

Messungen auf  $67,5^\circ$  normalisiert. Wie die Figur zeigt, wandert das Maximum mit steigenden Protonenenergien in Richtung kleinerer Winkel.

In den folgenden Fig. 4 und 5 wird die Frage nach dem Verlauf der Winkelverteilungskurve für eine bestimmte Protonenenergie noch einmal

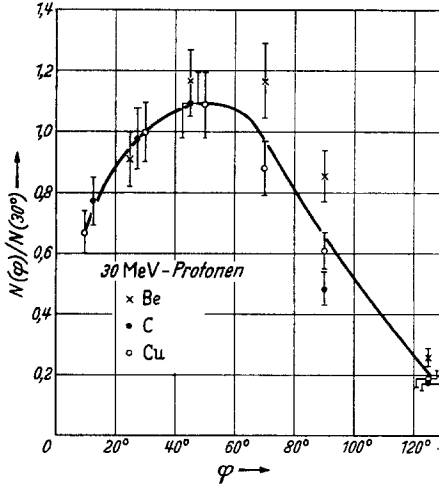


Fig. 4. Winkelverteilungskurve für 30 MeV-Protonen aus Be, C und Cu.

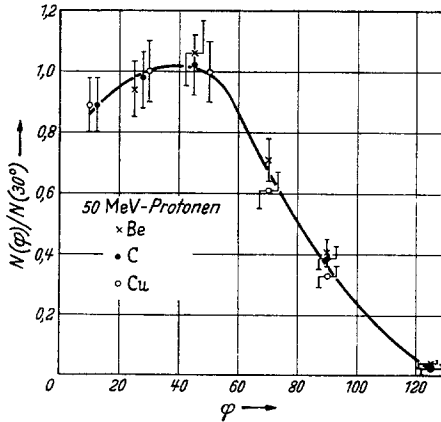


Fig. 5. Winkelverteilungskurve für 50 MeV-Protonen aus Be, C und Cu.

aufgegriffen. Die Darstellungen zeigen die Zahl der Protonen, die unter einem bestimmten Winkel ( $\varphi$ ) austreten, normiert auf die Protonenzahl für den Winkel von  $30^\circ$  zwischen  $\gamma$ -Strahl und Protonenaustrittsrichtung. Diese Normierung wurde gewählt, um den Verlauf der Kurve bei Winkeln kleiner als  $45^\circ$  deutlich hervortreten zu lassen, da, wie schon erwähnt wurde, die Messungen von LEVINTHAL und SILVERMAN für 40 MeV-



Protonen nur Winkel größer als  $45^\circ$  umfassen, und WALKER für 70 MeV-Protonen zu wenig Meßpunkte aufnahm, so daß in diesem Energiebereich die Form der Winkelverteilungskurve für Winkel die kleiner als  $45^\circ$  sind, noch nicht feststeht. Wie die Figuren zeigen, verschiebt sich das Maximum der Winkelverteilungskurve mit wachsender Protonenenergie in Richtung kleinerer Austrittswinkel.

Der experimentelle Teil dieser Arbeit wurde im Sommer des Jahres 1951 während eines halbjährigen Studienaufenthaltes im Rahmen des „Foreign Student Summer Project“ im Synchrotronlabor des Massachusetts Institute of Technology ausgeführt. Den Komiteemitgliedern des „F.S.S.P.“, sowie allen Angehörigen der Synchrotronarbeitsgruppe spreche ich für ihre freundliche Hilfsbereitschaft meinen herzlichsten Dank aus, insbesondere Herrn Professor Dr. B. T. FELD für die Anregung zu dieser Arbeit.

Die Auswertung der Kernphotoplatten erfolgte im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München. Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. G. JOOS, der mir die Institutsmittel zur Auswertung zur Verfügung stellte und mich dabei und bei der theoretischen Deutung laufend beriet.

*München*, Physikalisches Institut der Technischen Hochschule.

---