

Ein neuer hochauflösender Massenspektrograph

J. GEERK

Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis

Herrn Prof. Dr. J. MATTAUCH zum 70. Geburtstag gewidmet

(Z. Naturforschg. 21 a, 34—36 [1966] ; eingegangen am 22. Juli 1965)

I. Die Konzeption des Apparates

Es wird ein Massenspektrograph vorgeschlagen, der aus einem homogenen Magnetfeld M und einem vorgeschalteten elektrischen Radialfeld E mit gleichsinniger Ablenkung besteht (siehe Abb. 1). Das Radialfeld hat einen Ablenkwinkel $\Phi_e = 127^\circ 17'$. Der Ablenkradius sei r_e . Das Magnetfeld besitzt nur eine einzige Begrenzungsgerade. Die optische Achse zwischen dem Radialfeld und dem Magnetfeld bildet mit der Senkrechten zur Begrenzungsgeraden den Winkel $\varepsilon_0 = \arctan(1/2) \sqrt{2} = 35^\circ 16'$. Der Ablenkwinkel Φ im Magnetfeld ist für alle Ionensorten konstant $= \pi - 2\varepsilon_0 = 109^\circ 28'$. Der Austrittswinkel der optischen Achse ist ebenfalls ε_0 .

Wir betrachten ein homozentrisches Strahlenbündel isokinetischer Ionen der Masse m mit dem halben Öffnungswinkel des Bündels α_0 , das im Punkte P_1 seinen Ursprung hat. Wir erhalten einen zu P_1 konjugierten Punkt P_2 , wenn die Abbildungs-gleichung

$$\frac{l_1}{r} + \frac{l_2}{r} = \frac{2}{3} \sqrt{2} \quad (1)$$

erfüllt ist. Darin sind l_1 und l_2 — wie üblich — die Abstände zweier konjugierter Punkte von der Feldbegrenzung, gemessen auf dem Mittelstrahl. r sei der Ablenkradius für ein Ion der Masse m . Die Strahlenvereinigung in P_2 ist von zweiter Ordnung, d. h. es schneiden sich in P_2 drei unendlich benachbarte Bildstrahlen.

Wir betrachten nun ein zweites, aus der gleichen Ionensorte bestehendes Strahlenbündel, das infolge der durch das Radialfeld verursachten Energiedispersion in P_1' seinen Ursprung hat. Die Mittelstrahlen beider Bündel sind wegen der $127^\circ 17'$ -Ablenkung achsenparallel; sie treten auch achsenparallel aus dem Magnetfeld aus.

Macht man nun die Energiedispersion der Ionen, die sie durch das Magnetfeld erfahren, gleich der Energiedispersion infolge des Radialfeldes, so kommen die Mittelstrahlen der beiden Bündel P_1 und P_1' und aller anderen Elementarbündel zwischen den Punkten P_1 und P_1' beim Austritt aus dem Magnetfeld zur Deckung, und wir haben nur noch ein einziges jetzt konvergentes Strahlenbündel austreten der Ionen einer Ionenmasse.

Es handelt sich hier nicht um die klassische Energiefokussierung, die darin besteht, daß die Mittelstrahlen der Elementarbündel unterschiedlicher Ionenergie sich in einem Punkte, dem Fokus, schneiden. In unserem Falle wird das ursprüngliche, am Eintrittsspalt S_1 des Radialfeldes vorhandene Dingstrahlenbündel energieinhomogener Ionen einer Ionensorte mit dem Öffnungswinkel $2\alpha_0$ beim Verlassen des Magnetfeldes als konvergentes Bildstrahlenbündel energieinhomogener Ionen mit demselben Öffnungswinkel $2\alpha_0$ gleichsam wiederhergestellt, wobei die durch die Energieblende S_2 ausgeblendeten Ionen natürlich nicht mitzählen.

Die Energiedispersion für das $127^\circ 17'$ -Radialfeld lautet:

$$dp_R = \frac{1}{2} \frac{dU}{U} 2r_e, \quad (2)$$

die für das homogene Magnetfeld

$$dp_M = \frac{1}{2} \frac{dU}{U} D r, \quad (3)$$

worin der Wert dU/U gleich der relativen Energieunschärfe der Ionen ist.

Der geometrische Dispersionskoeffizient D^1 ist eine reine Zahl und hat für alle in zweiter Ordnung fokussierende, im Maßstab 1:1 abbildende, gradlinig begrenzte, magnetische Sektorfelder den Wert $D = 4/3$. Somit erhalten wir mittels (2) und (3) den Energieunschärfefehler:

$$a_u = dp_R - dp_M = \frac{dU}{U} (r_e - \frac{2}{3} r). \quad (4)$$

¹ J. GEERK u. C. HEINZ, Z. Phys. 133, 513 [1952].



a_u wird Null und die Mittelstrahlen der energie-dispergierten Elementarbüschel kommen beim Austritt aus dem Magnetfeld zur Deckung, wenn in (4) der Klammerwert Null wird; d. h. es ist die Bedingung zu erfüllen:

$$r = r_0 = \frac{3}{2} r_e. \quad (5)$$

Die Strahlen der Büschel P_1 und P_1' für r_0 sind in Abb. 1 eingezeichnet.

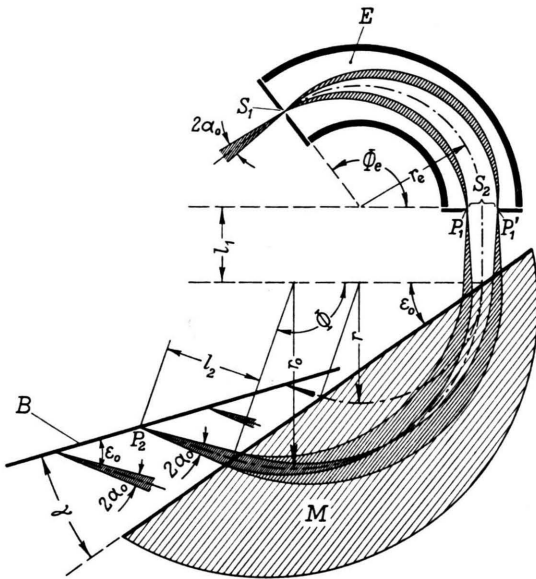


Abb. 1. Prinzipskizze eines Massenspektrographen mit teleskopischem Strahlengang.

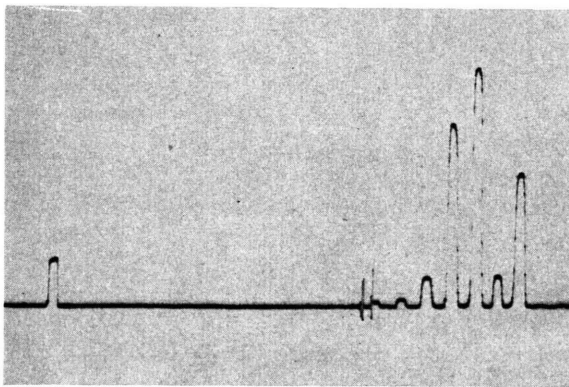


Abb. 2. Zwecks Nachweises der Bildgeraden und der Korrektur der Bildfehler 1. und 2. Ordnung wurde an Stelle des Radialfeldes im Punkte P_1 eine Elektronenstoßionenquelle mit einem Öffnungswinkel des Strahlenbüschels von 20° angebracht. Auf der Bildgeraden wurde ein Laufkäfig mechanisch bewegt. Gasprobe: Leuchtgas. Gemessene Ionenpeaks von links nach rechts: Massenzahl 2, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 (19, 20 sehr schwach).

II. Das Strahlensystem und die Bildkurve

Da die Feldbegrenzung aus einer einzigen Geraden besteht, sind die geometrischen Gebilde des Strahlenganges für alle Ionensorten samt der die Öffnungsfehler bestimmenden Kaustiken einander ähnlich. Infolgedessen ist die Bildkurve für Richtungsfokussierung eine Gerade B ; sie schließt mit der Feldbegrenzung den Winkel $\gamma = \frac{1}{2}\pi - 2\varepsilon_0 = 19^\circ 28'$ ein (siehe auch Abb. 2).

Das Strahlensystem ist teleskopisch. Folglich sind die Angular-, die Lateral- und die Tiefenvergrößerung aller auf die Bildgerade gelangenden, abbildenden (von den einzelnen Ionensorten erzeugten) Strahlenbüschel konstant gleich Eins. Bei einer Änderung des Abstandes Radialfeld – Magnetfeld l_1 um ein endliches Stück λ innerhalb der Grenzen $0 \leq l_1 \leq (2/3)\sqrt{2} \cdot r_0$ erfährt die Bildgerade gemäß der Abbildungsgleichung (1) lediglich eine Parallelverschiebung in Achsenrichtung um das gleiche Stück λ , ohne daß sich an dem Spektrum auf der Bildgeraden irgendetwas (Vergrößerung, Fehler usw.) ändert. Diese Besonderheit bringt wesentliche Justiervorteile. Der Strahlengang im Magnetfeld hat für jede Ionensorte ein lichtoptisches Analogon in einem System zweier gleicher, coaxialer Zylinderlinsen im Abstände der doppelten Brennweite.

III. Die Abbildungsfehler

1. Der Energieunschärfefehler a_u

Die Bedingung (5) ist nur an einer Stelle der Platte erfüllt. Läßt man die Ionensorte, die auf dem Kreisbogen mit dem Ablenkradius $r = r_0 = (3/2)r_e$ – d. h. Fehler $a_u = 0$ – fliegt, in die Plattenmitte fallen, so erhält man für eine Ionensorte mit dem Ablenkradius r im Magnetfeld den Unschärfefehler mittels der Gl. (4). Macht man ferner $r_{\min} = r_e$ und $r_{\max} = 2r_e$, dann erhält man ein Spektrum von 2 Oktaven und an den Enden der Platte gleich große maximale Fehler der Größe:

$$a_{u \max} = \pm \frac{1}{3} \frac{dU}{U} r_e, \quad (6)$$

wobei die beaufschlagte Plattenlänge $L = (4/3)\sqrt{3} \cdot r_e$ beträgt.

2. Der Öffnungsfehler des Radialfeldes a_e

Dieser beträgt für das $127^\circ 17'$ -Radialfeld bekanntlich

$$a_e = \frac{4}{3} r_e \alpha_0^2. \quad (7)$$

3. Aberrationen, verursacht durch Magnetfeld und Radialfeld a_m

Es treten ein Queraberrationsfehler und ein Längsaberrationsfehler auf. Der Queraberrationsfehler (Öffnungsfehler) ist für alle auf die Platte gelangenden Strahlenbüschel der verschiedenen Ionensorten bis auf Fehler zweiter Ordnung einschließlich korrigiert und tritt erst mit der dritten Potenz von α_0 auf. Da außerdem die ABBÉsche Sinusbedingung erfüllt ist, sind die durch die Strahlenbüschel der verschiedenen Ionensorten vermittelten Abbildungen sämtlich aplanatisch von zweiter Ordnung.

Der Längsaberrationsfehler kommt dadurch zustande, daß z. B. für den Strahlengang $r_0 = (3/2)r_e$ die Mittelstrahlen der durch das Radialfeld dispergierten Elementarbüschel P_1 bis P_1' nach Verlassen des Magnetfeldes zwar wieder zusammenfallen, die Fokusse der Büschel jedoch nicht an der gleichen Stelle auf ihrem gemeinsamen Mittelstrahl liegen, sondern längsdispergieren. Dieser Fehler ist dU/U und α_0 proportional.

Mittels einer an anderer Stelle beschriebenen Methode der Fehlerrechnung² wurden zwei einfache Approximationsformeln abgeleitet (8 a und b); diese gelten – aneinander anschließend – für den ganzen in Frage kommenden Bereich von dU/U , α_0 und nähern sich bis auf mindestens 97% der genauen Fehlerkurve.

$$a_{m1} = 0,8\sqrt{2} r_e \frac{dU}{U} \alpha_0 + \frac{1}{3} \sqrt{2} r \alpha_0^3, \quad (8 a)$$

$$a_{m2} = \sqrt{2} r_e \frac{dU}{U} \alpha_0. \quad (8 b)$$

(8 a) gilt im Bereich $0 \leq \eta < 2,5$, (8 b) im Bereich $2,5 \leq \eta$, worin bedeutet:

$$\eta = \sqrt{2} \frac{r_e}{r} \frac{dU/U}{\alpha_0^2}. \quad (9)$$

Der Energieunschärfefehler a_u , soweit vorhanden, sowie der Aberrationsfehler des Radialfeldes a_e und der Aberrationsfehler von Magnetfeld und Radialfeld a_{m1} bzw. a_{m2} sind zu superponieren.

² J. GEERK, Phys. Verhandl. 1953, 6.