

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Bonn

## Eine Lumineszenzkammer

Von

O. GILDEMEISTER

Mit 5 Figuren im Text

(Eingegangen am 12. März 1963)

A luminescent chamber, consisting of a homogenous CsJ–Tl-scintillator and a four-stage magnetically focussed image intensifier, has been built. Using large aperture lenses for the imaging of the intensifier output screen to the photographic film, the light spot from a single photoelectron of the intensifier front-photocathode can easily be photographed. Intensification and resolution of the intensifier are about  $10^6$  and 0.1 mm respectively. The conditions for seeing tracks of minimum ionising particles and the problems of spacial and time-resolution, of the depth of sharpness and the possibilities of stereo-viewing are discussed. Photographs of 400 MeV-positron tracks are shown. The density of image spots in this case is 20–40 per cm track length. A comparison of the luminescent chamber with other track chambers is discussed.

Für viele Experimente an relativ sehr seltenen Elementarprozessen sind die herkömmlichen Teilchendetektoren unvorteilhaft: die Zähl-anordnungen, weil entweder der erfaßte Raumwinkel im Konfigurations-raum aller beteiligten Partikel zu klein oder die Diskriminierung des Untergrundes unvollkommen ist; die Nebel- und Blaskammern (Bahn-detektoren), weil wegen der geringen zeitlichen Auflösung der nutzbare Teilchenfluß zu klein ist und bei der Blaskammer außerdem die Expansion nicht von dem Ereignis ausgelöst werden kann.

In diesen Fällen sind *Bahndektoren* mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung erwünscht, die von bestimmten — von Zähleranordnungen diskriminierten — Ereignissen ausgelöst werden können. Die reziproke Zeitauflösung ist die Aufnahmedauer. Sie bestimmt, wie groß der Teilchenfluß sein darf, ohne daß auf ein Bild zu viele Untergrundspuren kommen außer dem Ereignis, das den Auslöseimpuls erzeugt. Neben der Funkenkammer erfüllt die Lumineszenzkammer diese Bedingungen. Das zeitliche Auflösungsvermögen liegt in beiden Fällen bei etwa  $10^{-6}$  s. Die Lumineszenzkammer läßt dabei mehr Informationen über das Ereignis erwarten als die Funkenkammer. Verifiziert wurde die Lumineszenzkammer erstmals 1955 von ZAVOISKII\*<sup>1</sup>. Seitdem wurde von

\* Diese Lumineszenzkammer enthielt einen Bildverstärker mit etwa 8 mm Bilddurchmesser. Spuren von 200 MeV-Protonen in CsI–Tl konnten damit photographiert werden.

<sup>1</sup> ZAVOISKII, E.K., M.M. BUTSLOV, A.G. PLAKHOV and G.E. SMOLKIN: J. Nuclear Energy 4, 340 (1957).

verschiedenen Seiten daran gearbeitet<sup>2</sup>. Bei der vorliegenden Arbeit sollte die Qualität der Spurenbilder erhöht und die Eigenschaften der Lumineszenzkammer untersucht werden.

### 1. Aufbau und Wirkungsweise der Lumineszenzkammer

Bei der Lumineszenzkammer werden die Leuchtspuren, die hochenergetische geladene Teilchen in szintillierendem Material erzeugen, über einen elektronenoptischen „Bildverstärker“ photographiert.

Fig. 1 zeigt die Anordnung. Ein Szintillatorkristall wird mit einer lichtstarken Optik auf die Eintrittsfläche des Bildverstärkers abgebildet. Das in der Helligkeit um mehrere Größenordnungen verstärkte Bild der Leuchtspur im Szintillator erscheint auf der Ausgangsfläche des

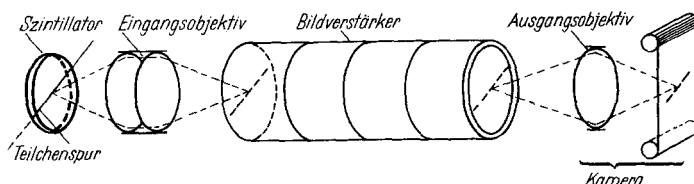


Fig. 1. Lumineszenzkammer, schematisch

Bildverstärkers und wird mit einer automatisch transportierenden Kamera mit lichtstarker Optik photographiert. Entscheidend für die Qualität der Spurenbilder ist die minimale Quantendichte der Bilder, die während des Übertragungs- und Verstärkungsprozesses auftritt. Die im Szintillator erzeugte Lichtquantendichte ist von der Ausbeute des Szintillatormaterials und der spezifischen Ionisation des anregenden Teilchens abhängig. Größenordnungsmäßig werden von einem minimumionisierenden Teilchen in einem CsJ-Tl-Szintillator  $10^5$  Lichtquanten pro cm Weglänge erzeugt. Davon wird bei der Abbildung auf den Bildverstärker nur ein kleiner Teil ausgenutzt, der durch den Aperturwinkel der verwendeten Optik, die Lichtbrechung an der Kristall-Grenzfläche und die begrenzte Transmission der Optik gegeben ist. Selbst bei sehr lichtstarker 1:1-Abbildung ist nur mit etwa 1% des erzeugten Lichtes am Bildverstärker zu rechnen. Im Bildverstärker werden von den Lichtquanten zunächst aus einer Photokathode Photoelektronen emittiert. Dabei geht ein Quantenwirkungsgrad ein, der je nach dem Spektrum des Szintillatorlichtes und der Qualität der Photokathode zwischen 2 und 10% liegt. Die Quantendichte der Bilder ist damit schon auf 20 bis  $100\text{ cm}^{-1}$  reduziert. Eine verkleinernde Abbildung, die in vielen Fällen nötig ist, ergibt nach Abschnitt 4 noch geringere Quantendichten. Es ist daher erwünscht, daß diese Quantendichte

<sup>2</sup> Zusammenfassender Bericht: PERL, M.L., and L.W. JONES: Nucleonics 18, Nr. 5, 92 (Mai 1960).

nicht noch weiter reduziert wird. Dazu muß jedes Photoelektron, das von der Photokathode am Eingang des Bildverstärkers emittiert wird, im photographischen Bild einen Bildpunkt erzeugen. Dort erscheint dann die Teilchenspur als punktierte Linie.

## 2. Konstruktion und Eigenschaften des Bildverstärkers

Für die Bildverstärkung wurde eine vierstufige Bildwandlerröhre gebaut<sup>3</sup>. Die Elektronen der Eingangsphotokathode (CsSb) werden in einer ersten Laufstrecke von 8 cm Länge in einem homogenen elektrischen Feld auf 10 bis 12 keV beschleunigt und auf einen Leuchtschirm (ZnS-Ag) geschossen. Mit einem axialen Magnetfeld von 1500 Gauß werden die Elektronen dabei auf nahezu achsparallelen Bahnen gehalten, so daß das Elektronenbild erhalten bleibt. Der Leuchtschirm ist auf eine etwa  $10\ \mu$  starke Glasfolie gebracht, deren Rückseite mit einer zweiten Photokathode bedampft ist. Die Rückwärtsstrahlung des Leuchtschirmes wird durch eine elektronendurchlässige  $120\ m\mu$  starke Aluminiumhaut verhindert, die über dem Leuchtschirm ausgebreitet ist. Die Photoelektronen der zweiten Kathode werden wieder beschleunigt und das Spiel wiederholt sich insgesamt in vier Stufen.

Die Beschleunigungsspannungen an einzelnen Stufen müssen gepulst werden. Liegt die Nachleuchtdauer des Szintillators in der Größenordnung  $1\ \mu$ s oder darüber, kann die erste Bildverstärkerstufe gepulst werden. Klingt der Szintillator wesentlich schneller ab, dann muß das Bild im Leuchtschirm der ersten Stufe gespeichert werden bis das Triggersignal einen Hochspannungspuls ausgelöst hat. Dann wird zweckmäßigerweise die zweite Bildverstärkerstufe gepulst. Das dabei erreichbare zeitliche Auflösungsvermögen ist dann von der Nachleuchtdauer des Leuchtstoffes abhängig und beträgt bei dem in dieser Beziehung ungünstigen ZnS-Ag etwa  $300\ \mu$ s. Für diesen Fall wäre es angebracht, einen schneller abklingenden Leuchtstoff in der ersten Bildverstärkerstufe zu verwenden.

In beiden Fällen wird außerdem die letzte Stufe gepulst. Damit wird verhindert, daß während langer Aufnahmepausen der Film vom Untergrundleuchten des Bildverstärkers geschwärzt wird. Ein mechanischer Kameraverschluß erübrigt sich deshalb.

Der gebaute Bildverstärker hat einen Bilddurchmesser von 3 cm. Die Verstärkung des Lichtstromes beträgt etwa  $10^6$  bei einer Gesamtspannung von 56 kV, verteilt über die vier Stufen. Die für das Quantenminimum wichtige Quantenausbeute der Eingangsphotokathode

---

<sup>3</sup> GILDEMEISTER, O., u. R. GIESE: Ein Bildverstärker für die Teilchenspurphotographie. Z. angew. Phys. (erscheint in Kürze).

beträgt im Maximum der spektralen Empfindlichkeit 15%. Der Durchmesser eines von einem einzelnen Photoelektron herrührenden Leuchtfleckes auf dem Ausgangsschirm beträgt 100 bis 120  $\mu$ . Diese Größe bestimmt das geometrische Auflösungsvermögen des Bildverstärkers. Normalerweise wird das Auflösungsvermögen der Lumineszenzkammer aber stärker von der begrenzten Schärfe und Tiefenschärfe der Eingangsoptik beeinflusst. Sie bestimmt die Streubreite der Punktfolgen in den Spurenbildern. Der Dunkelstrom der Eingangsphotokathode ist  $\approx 10^{-15}$  [A/cm<sup>2</sup>], so daß selbst bei einer Pulszeit von 300  $\mu$ s nur etwa 15 Untergrund-Lichtpunkte durch thermische Emission auftreten.

Das axiale Magnetfeld von 1500 Gauß wird von zehn aneinandergereihten, aus Kupferband gewickelten Scheibenspulen erzeugt. Der Innendurchmesser ist 18 cm, der Außendurchmesser 30 cm. Die Verlustwärme wird auf zwischenliegende Kupferscheiben übertragen. Die Scheiben sind am Außenrand wassergekühlt. Die Stromdichte ist 6 A/mm<sup>2</sup>, und die Anschlußwerte der ganzen 50 cm langen Spule sind 100 V, 60 A.

### 3. Hochspannungsimpulse

Die Beschleunigungsspannungen entweder der ersten und letzten oder der zweiten und letzten Stufe des Bildverstärkers sollen gepulst werden. Für die verschiedenen Anwendungen wurden drei Hochspannungsimpulsgeräte gebaut<sup>4</sup>:

a) Ein Gerät zum Pulsen der letzten Stufe. Es erzeugt einen positiven Spannungsimpuls von 10 bis 18 kV Amplitude und 5 bis 20 ms Dauer. Es besteht aus zwei Quecksilberdampfthyratrons. Das erste wird vom Triggersignal gezündet und lädt die Belastungskapazität auf die gewünschte Spannung auf, das zweite Thyatron wird verzögert gezündet und entlädt die Ausgangskapazität wieder.

b) Ein Gerät zum Pulsen der ersten oder zweiten Stufe. Es liefert einen negativen 10 bis 16 kV-Impuls von 0,1 bis 1 ms Dauer. Es ist ähnlich wie das Gerät a), aber mit zwei Wasserstoffthyratrons aufgebaut. Die Verzögerung zwischen Triggersignal und dem Hochspannungsimpuls beträgt etwa  $2 \cdot 10^{-4}$  s.

c) Ein Pulsgenerator zum schnellen Einschalten der ersten Stufe mit möglichst geringer Verzögerung (Fig. 2). Er enthält nur Vakuumröhren und liefert negative Impulse bis zu 16 kV Amplitude und  $10^{-7}$  bis  $10^{-5}$  s Dauer. Die Verzögerung zwischen einem Multiplier-Koinzidenzsignal und dem vollen Wert der Hochspannung beträgt 50 ns bei 12 kV Amplitude. Eine zusätzliche Verzögerung zwischen der Szintillation eines Zählers und dem Hochspannungsimpuls entsteht durch die Elektronen-

<sup>4</sup> BRINCKMANN, P.: Elektronische Steuerung einer Lumineszenzkammer (Diplomarbeit), Physikalisches Institut der Universität Bonn.

laufzeit in dem Multiplier. Gute Werte liegen bisher bei 30 ns. Die resultierende Gesamtverzögerung zwischen dem Teilchendurchgang und dem Hochspannungsimpuls von 80 ns an der ersten Bildverstärkerstufe ermöglicht es gerade noch, für die Lumineszenzkammern ein NaJ-Kristall (Nachleuchtzeitkonstante  $\approx 0,25 \mu\text{s}$ ) zu benutzen. Die Pulszeit

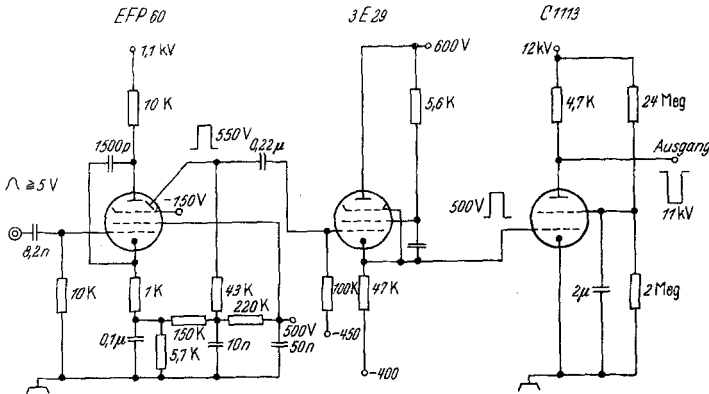


Fig. 2. Hochspannungs-Rechteckpulsgenerator

(=Auflösungszeit der Lumineszenzkammer) kann dann auf 0,7 bis 1  $\mu\text{s}$  eingestellt werden. Bei Verwendung eines CsJ-Tl-Kristalls muß wegen des längeren Nachleuchtens die Pulszeit größer sein (3 bis 10  $\mu\text{s}$ ).

#### 4. Optische Abbildung

a) **Abbildung zwischen Szintillator und Bildverstärker.** Die Optik, die den Szintillator auf den Bildverstärker abbildet, soll vor allem möglichst lichtstark sein, damit die Bildpunktdichte nicht zu klein wird. Handelsübliche Objektive hoher Apertur sind gewöhnlich auf Abbildung aus dem Unendlichen korrigiert. Zunächst sollte der Abbildungsmaßstab 1:1 betragen. Deshalb wurden zwei gleiche Objektive (Astro Tachonar  $f:1; 75 \text{ mm}$ ) mit ihren Frontlinsen gegeneinandergesetzt. Das erste Objektiv bildet die Spur in das Unendliche, das zweite aus dem Unendlichen auf den Bildverstärker ab. Dabei wird von dem gesamten Szintillatorlicht ein Anteil  $\alpha$  auf den Bildverstärker übertragen. Ohne Berücksichtigung der Vignettierung — also für achснаhe Bildpunkte — ist

$$\alpha = \frac{T_0}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \frac{(D/2g)^2}{1 + (D/2g)^2}} \right] \quad (1)$$

- $g$  = Gegenstands Entfernung (scheinbare Entfernung),
- $T_0$  = Transmission der Optik,
- $n$  = Brechungsindex des Szintillators.

Bei dem betrachteten Linsensystem ist  $T_0 \approx 0,5$ ,  $n^2 \approx 3$ ,  $\frac{D}{2g} = \frac{1}{2}$  und damit  $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-3}$ .

Der Tiefenschärfebereich ( $2t$ ) im Kristall wird durch die Brechung an der Kristall-Grenzfläche vergrößert. Es ist

$$t = \frac{s}{\gamma \cdot D/g} n \sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left(\frac{D}{2g}\right)^2}, \quad (2)$$

wenn  $s$  der Streukreisdurchmesser und  $\gamma = \frac{b}{g}$  der Abbildungsmaßstab ist.

Mit den oben angegebenen Werten für  $n$  und  $D/g$  wird mit  $\gamma = 1$

$$2t = 3,75 \cdot s.$$

Bei einem maximalen Streukreisdurchmesser von 1 mm ist die ausnutzbare Tiefe des Kristalls also 3,7 mm bei der verwendeten Anordnung.

Größere Kristalle können verkleinert abgebildet werden. Bei gleichbleibender Lichtstärke  $D/b$  des bildseitigen Objektivs geht, wie Gl. (1) für  $D/2g \ll 1$  zu entnehmen ist, die Bildpunktdichte — Zahl der Bildpunkte pro cm Länge im verkleinerten Bild der Spur — etwa linear mit dem Abbildungsmaßstab. Die ausnutzbare Kristalltiefe wächst nach Gl. (2) quadratisch mit dem reziproken Abbildungsmaßstab, wenn man auf den gleichen Streukreisdurchmesser im Bild bezieht. Das ist wichtig für die Möglichkeit einer stereoskopischen Abbildung von Szintillator-kristallen aus zwei zueinander senkrechten Richtungen. Die Kristallbreite des einen Bildes ist dann die Tiefe für das andere Bild. Schon bei einer 1:4-Verkleinerung wird die ausnutzbare Tiefe des Kristalles 6 cm, wenn wieder eine Streubreite der Spur im Bild von 1 mm zugelassen wird.

**b) Abbildung zwischen Bildverstärker und Film.** Eine lichtstarke Ausgangsoptik verringert die Verstärkungsanforderungen an den Bildverstärker. Da der „Gegenstand“ in einer Ebene (Leuchtschirm) liegt, fällt hier das Tiefenschärfenproblem fort. Dafür werden höhere Anforderungen an die Abbildungsschärfe gestellt. Vor allem ist es nur so lange sinnvoll, die Lichtstärke zu erhöhen, als die Leuchtdichte der Bildpunkte in der Filmebene tatsächlich wächst, und nicht der Gewinn an Lichtintensität durch die abnehmende Schärfe kompensiert wird. Der Abbildungsmaßstab ist durch das Filmformat (36 mm-Film) nach oben begrenzt. Bei den Aufnahmen mit der hier beschriebenen Lumineszenzkammer wurde bisher ein f:1,5-85 mm-Objektiv (Leitz-Summarex) gekoppelt mit einem f:2,5-200 mm-Projektionsobjektiv (Leitz-Hektor). Der Abbildungsmaßstab beträgt also 1:2,3.

## 5. Testen der Lumineszenzkammer mit Elektronenspuren

**a) Aufbau.** Zur Demonstration der Arbeitsweise der Lumineszenzkammer wurden 400 MeV-Positronen in den Szintillator eingeschossen und die entstehenden Leuchtspuren photographiert. Die experimentelle

Anordnung zeigt Fig. 3. Die  $\gamma$ -Bremsstrahlung aus dem Bonner 500 MeV-Elektronen-Synchrotron wurde kollimiert und die auf dem Luftweg von etwa 6 m Länge entstehenden Elektronenpaare magnetisch abgelenkt. Ausgeblendet wurden 400 MeV-Positronen und durch zwei Szintillationszähler auf den CsJ-Tl-Kristall geschossen. Die beiden Zähler gaben ein

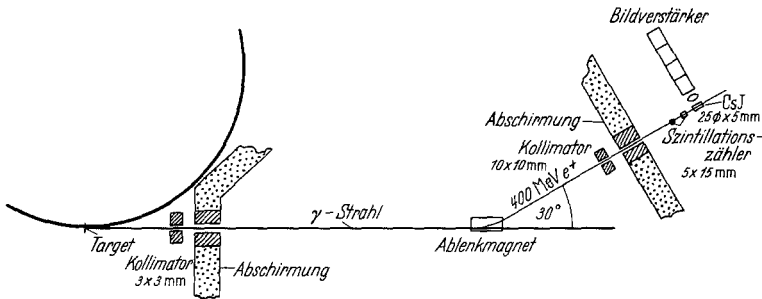


Fig. 3. Versuchsanordnung: Strahlführung

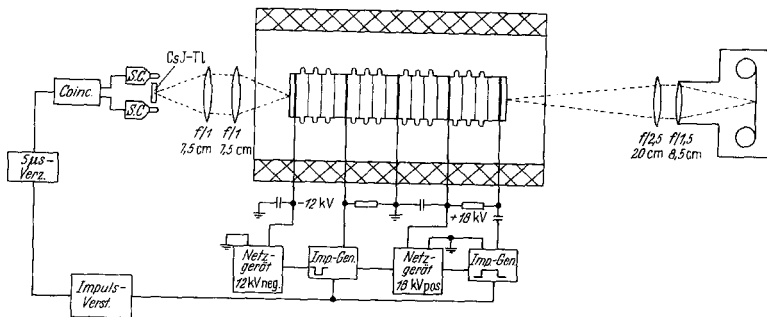


Fig. 4. Versuchsanordnung: Bildverstärker und elektronische Steuerung

Koinzidenzsignal zum Triggern der Bildverstärker-Impulse. Die Zähler-szintillatoren hatten einen Querschnitt von  $5 \times 15$  mm. Die Abmessungen des beobachteten Kristalls waren 25 mm Durchmesser und 5 mm Dicke. Er wurde mit dem eben beschriebenen System (zwei gekoppelte f:1-Objektive) im Maßstab 1:1 auf dem Bildverstärker abgebildet. Die verwendete Pulsanordnung zeigt Fig. 4.

Im Ruhezustand liegt an der Photokathode das Potential ( $-12$  kV), die erste und zweite Zwischenfolie haben Erdpotential und die dritte Folie und der Ausgangsleuchtschirm liegen  $18$  kV positiv. Während das Spurenbild im ersten Leuchtschirm gespeichert wird, löst das Koinzidenzsignal der Zähler zwei Hochspannungsimpulse aus. Einer bringt die erste Zwischenfolie für  $300 \mu\text{s}$  auf das Kathodenpotential ( $-12$  kV), so daß die zweite Verstärkerstufe eine Beschleunigungsspannung von

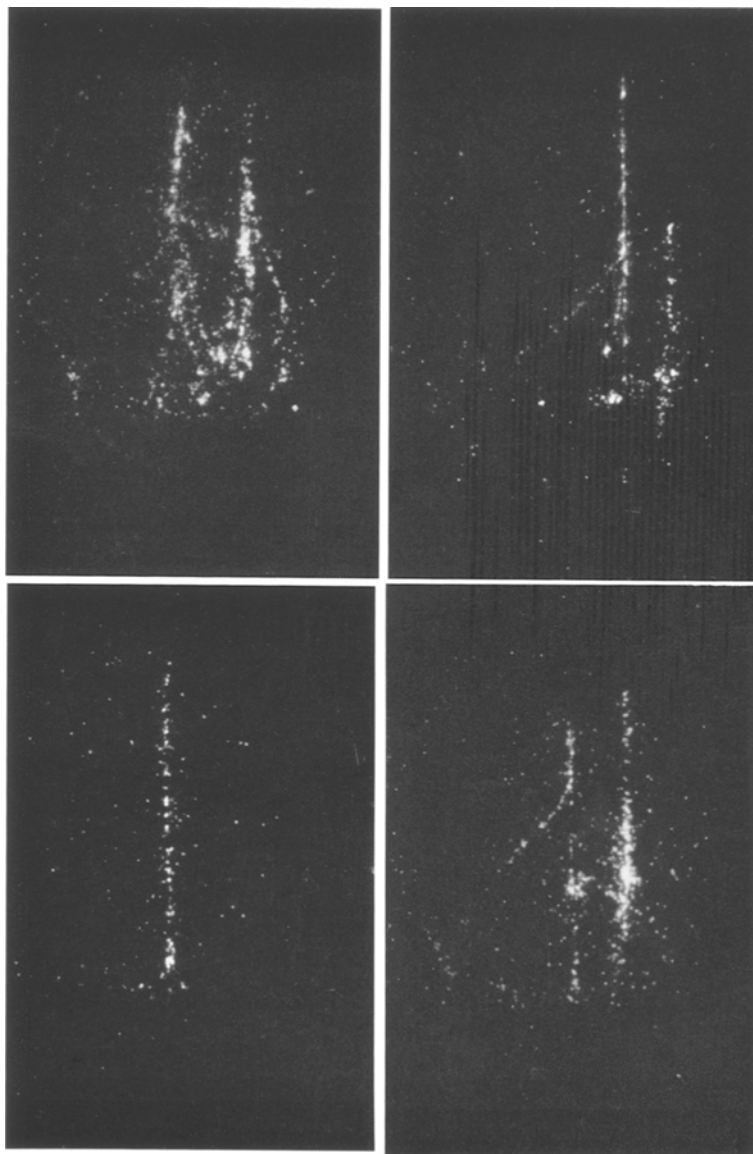


Fig. 5. Teilchenspuren in CsJ-Tl, eingeschossen: 400 MeV- $e^+$

12 kV erhält. Der zweite Hochspannungsimpuls von + 18 kV Amplitude und 10 ms Dauer wird dem Ausgangsschirm zugeführt, dessen Potential sich dadurch auf 36 kV erhöht.

Weil bei dieser Schaltung der erste Hochspannungsimpuls die erste Verstärkerstufe ausschaltet, wurde das Koinzidenzsignal vor der Impuls-



auslösung um  $8 \mu\text{s}$  verzögert. In dieser Zeit hat der Kristall seine Lichtenergie zu 83 % ausgestrahlt<sup>5</sup>, während der erste Leuchtschirm des Bildverstärkers erst 15 % seiner Energie verloren hat.

b) **Ergebnisse.** Fig. 5 zeigt einige auf diese Weise erhaltenen Bilder der Spuren, die von den eindringenden 400 MeV-Positronen in dem CsJ-Kristall erzeugt wurden. Die Punktdichte liegt mit 20 bis 40 [ $\text{cm}^{-1}$ ] in der erwarteten Größenordnung, wenn die Breite des Emissionsspektrums von CsJ(Tl)<sup>6</sup> im Vergleich zum Empfindlichkeitsspektrum der Photokathode berücksichtigt wird. Der mittlere Durchmesser einzelner Punkte auf dem Film (Bilddurchmesser: 13 mm) beträgt 50 bis 60  $\mu$ . Davon entfallen 10 bis 20  $\mu$  auf das Auflösungsvermögen von Optik und Film, so daß bei dem Abbildungsmaßstab 1:2,3 der Punktdurchmesser auf dem 30 mm großen Leuchtschirm des Bildverstärkers etwa 120  $\mu$  beträgt.

Auf den Bildern sind deutlich Spuren verschiedener Streubreite zu erkennen. Das bedeutet, daß die Spuren mehr oder weniger nahe der Schärfenebene der Eingangsoptik lagen. Eine Streubreite von 1 mm war bei 4,9 mm Entfernung von der Fokalebene zu erwarten. Störend ist auf den Bildern noch der Untergrund. Er ist nicht auf einen Dunkelstrom der Photokathode, sondern auf Streulicht zurückzuführen. Das im Kristall erzeugte Licht kann vor allem im Kristall selbst, aber auch in der Optik und im Innern des Bildverstärkers gestreut oder reflektiert werden. Daher ist die Untergrunddichte der gesamten Lichtmenge auf den Bildern proportional. Es ist zu erwarten, daß der Untergrund schon wesentlich reduziert wird, wenn die Lichtreflexion an der Rückseite des Kristalls verhindert wird. Weitere mögliche Maßnahmen sind: Auswahl streuarmer Objektive, Optimalvergütung der Linsenoberflächen für das Empfindlichkeitsspektrum der Photokathode, Vergrößerung der Lichtabsorption der Photokathode durch Erhöhung der Schichtdicke etwas über den für die Empfindlichkeit optimalen Wert.

## 6. Vergleich der Lumineszenzkammer mit anderen Bahndetektoren

Alle Bahndetektoren, Photoemulsion, Nebel- und Blaskammer, Lumineszenz- und Funkenkammer haben gemeinsam, daß der Energieverlust der Teilchen in dem Kammermedium nicht ausreicht, unmittelbar ein sichtbares Bild zu erzeugen. In allen Fällen entsteht zunächst ein latentes Bild, das erst durch Energiezufuhr verstärkt und umgewandelt wird. Die Lumineszenzkammer ist nun der einzige Bahndetektor, bei dem die Verstärkung völlig getrennt ist vom Ort der Entstehung

<sup>5</sup> EINFELD, K.: Z. Naturforsch. **14a**, 966 (1959).

<sup>6</sup> KNOEPFEL, H., E. LOEPFEL u. P. STOLL: Helv. Phys. Acta **30**, 521 (1957).

des latenten Bildes. Das hat zur Folge, daß die Wahl der Verstärkungsmethode unabhängiger ist, so daß die Forderung nach einem schnellen Verstärker, der vom Ereignis selbst kurzzeitig eingeschaltet wird, im Prinzip leicht zu erfüllen ist. Der Nachteil der räumlichen Trennung ist, daß bei der Übertragung des latenten Bildes auf den Verstärker — den Bildverstärker — unvermeidlich ein großer Teil der Information verloren geht. Deshalb ist die Lumineszenzkammer an Informationsgehalt beispielsweise der Blaskammer unterlegen. Ihr Anwendungsbereich beschränkt sich deshalb auf Experimente, bei denen die Vorteile der elektronischen Verstärkung (hohe Auflösung und Triggerbarkeit) entscheidend sind. Das sind vor allem Experimente an absolut oder relativ seltenen Prozessen. Um verschiedene Bahndetektoren in ihrer Eignung für die Untersuchung seltener Ereignisse vergleichen zu können, sollen folgende charakteristische Größen definiert werden:

1. Die Bildzeit  $t_b$ : Jedes Bild enthält die Spuren aller Ereignisse, die in das Zeitintervall  $t_b$  fallen.  $\frac{1}{t_b}$  ist das zeitliche Auflösungsvermögen. Bei der Lumineszenz- und Funkenkammer ist  $t_b^L \approx t_b^F \approx 10^{-6}$  s, gegeben durch die elektronischen Impulsverzögerung. Bei der Blaskammer ist  $t_b^B \approx 10^{-3}$  s, die „empfindliche Zeit“.

2. Die Totzeit  $t_0$  ist die Zeit, die ein Bahndetektor braucht, bis er nach einer Auslösung wieder für eine neue Aufnahme bereit ist.  $\frac{1}{t_0}$  ist die maximale Aufnahme Frequenz. Für die Untersuchung seltener Ereignisse ist die Totzeit nur bei der Blaskammer eine wichtige Größe. Sie bestimmt die mögliche Expansionsfrequenz und beträgt etwa 1 s.

**a) Vergleich Lumineszenzkammer—Blaskammer.** Bei der Blaskammer kann wohl die Filmbelichtung, nicht aber die Expansion der Kammer von dem Ereignis ausgelöst werden, das aufgenommen werden soll. Wenn die interessierenden Ereignisse in relativ großen und statistisch verteilten Zeitabständen eintreten, wie bei Höhenstrahlexperimenten, wird nur der Bruchteil  $\frac{t_b^B}{t_0^B} \approx 10^{-3}$  der Ereignisse aufgenommen. Bei der Lumineszenzkammer ist der Aufnahmewirkungsgrad unter diesen Bedingungen 100%.

Ist allerdings die Strahlung wie bei einem Synchrotron gepulst mit einer Pulszeit  $t_p$  und einem Pulsabstand  $t_a$ , dann ist für  $t_p < t_b^B$  und  $t_a < t_0^B$  der Aufnahmewirkungsgrad bei der Blaskammer  $\frac{t_a}{t_0^B}$ , liegt deshalb je nach dem Pulsabstand zwischen 1 und 100%.

Der entscheidende Vorteil der Lumineszenzkammer gegenüber der Blaskammer ist aber die kurze Bildzeit  $t_b^L \approx 10^{-6}$  s. Sie wirkt sich aus, wenn die maximal mögliche Strahlintensität von der Blaskammer nicht verarbeitet werden kann, weil sonst zu viele Untergrundspuren

auf jedes Bild kämen. Bei gegebener Strahlintensität ist die Zahl der Untergrundspuren pro Bild der Bildzeit proportional. Das bedeutet, daß die Strahlintensität bei der Lumineszenzkammer etwa  $10^3$ mal größer sein kann als bei der Blaskammer. In einer vorgegebenen Zeit ist die Zahl der Spurenbilder von den interessierenden seltenen Ereignissen bei der Lumineszenzkammer daher  $10^3$  bis  $10^5$ mal größer.

Daraus ergibt sich nicht nur, daß die Experimentierzeit für Untersuchungen, die mit der Blaskammer möglich sind, verkürzt werden kann. Wichtiger ist, daß Untersuchungen von Ereignissen mit extrem kleinem Wirkungsquerschnitt überhaupt erst ermöglicht werden.

**b) Vergleich Lumineszenzkammer—Nebelkammer.** Bei der Expansions-Nebelkammer kann im Gegensatz zur Blaskammer die Expansion von dem Ereignis ausgelöst werden, weil die in der Kammer gebildeten Ionen eine zur Expansionszeit lange Lebensdauer haben. Die Bildzeit  $t_b^N$  liegt aber in der Größenordnung 1 s, so daß auch hier nur kleine Strahlungsintensitäten verarbeitet werden können und deshalb die Bildfrequenz bis zu einem Faktor  $10^6$  kleiner ist als bei der Lumineszenzkammer.

Abgesehen von dem Zeitverhalten ist die Nebelkammer für Hochenergieexperimente wegen der geringen Dichte des Mediums in den meisten Fällen ungeeignet.

**c) Vergleich Lumineszenzkammer—Funkenkammer.** Die Funkenkammer hat etwa das gleiche Zeitverhalten wie die Lumineszenzkammer. Die Bildzeit ist in beiden Fällen in erster Linie von der elektronischen Pulsverzögerung nach unten begrenzt. Ein Nachteil der Funkenkammer ist in manchen Fällen die Inhomogenität des Mediums. Ferner wird häufig die Spur eines Teilchens von der eines anderen ausgelöscht, besonders dann, wenn die Ionisationsdichten merklich verschieden sind. Es ist also schwierig, mehrere Teilchen gleichzeitig in einer Funkenkammer nachzuweisen. Für Messungen am Zerfall von Teilchen — etwa zur Diskriminierung der Teilchenart — ist die Funkenkammer meistens besser geeignet, weil bei ihr große Dimensionen möglich und daher große Bahnlängen beobachtet werden können. (Größenordnung 1 bis 10 m.)

Es ist daher naheliegend, Funkenkammer und Lumineszenzkammer zu kombinieren. Ein interessierender Prozeß könnte in der Lumineszenzkammer beobachtet, und die sekundären Partikel mit Funkenkammern diskriminiert werden. So ist zu erwarten, daß die Lumineszenzkammer neue experimentelle Möglichkeiten erschließt.

Ich danke Herrn Professor Dr. W. PAUL für die Anregung zu dieser Arbeit und den Herren Dipl.-Phys. R. GIESE und Dipl.-Phys. P. BRINCKMANN für die Hilfe beim Bau und Betrieb der Lumineszenzkammer. Die Arbeit wurde vom Bundesministerium für Atomforschung unterstützt.