

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 34 (1961)  
**Heft:** IV

**Artikel:** Erfahrungen mit dem symmetrischen Kaskadengenerator für 4 MV am Physikalischen Institut der Universität Basel  
**Autor:** Galli, R. / Baumgartner, E. / Huber, P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-113180>

#### 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:** 16.01.2026

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

# **Erfahrungen mit dem symmetrischen Kaskadengenerator für 4 MV am Physikalischen Institut der Universität Basel**

von **R. Galli, E. Baumgartner und P. Huber**

Physikalische Anstalt der Universität Basel

(18. XII. 1960)

Die symmetrische Kaskadenanordnung macht es möglich, die mit den üblichen Kaskadengeneratoren bisher erreichten Spannungen wesentlich zu überschreiten. Im Vergleich zu Van de Graaff-Generatoren sind bei etwa gleicher Spannungskonstanz wesentlich höhere Ströme zu erwarten<sup>1)</sup>.

Im vorliegenden Bericht werden experimentelle Erfahrungen mit einer 20stufigen symmetrischen 4 MV Kaskadenbeschleunigungsanlage, insbesondere mit dem Beschleunigungsrohr wiedergegeben. Die Beschreibung des Gleichrichterteils\*) ist Gegenstand einer weiteren Mitteilung<sup>2)</sup>.

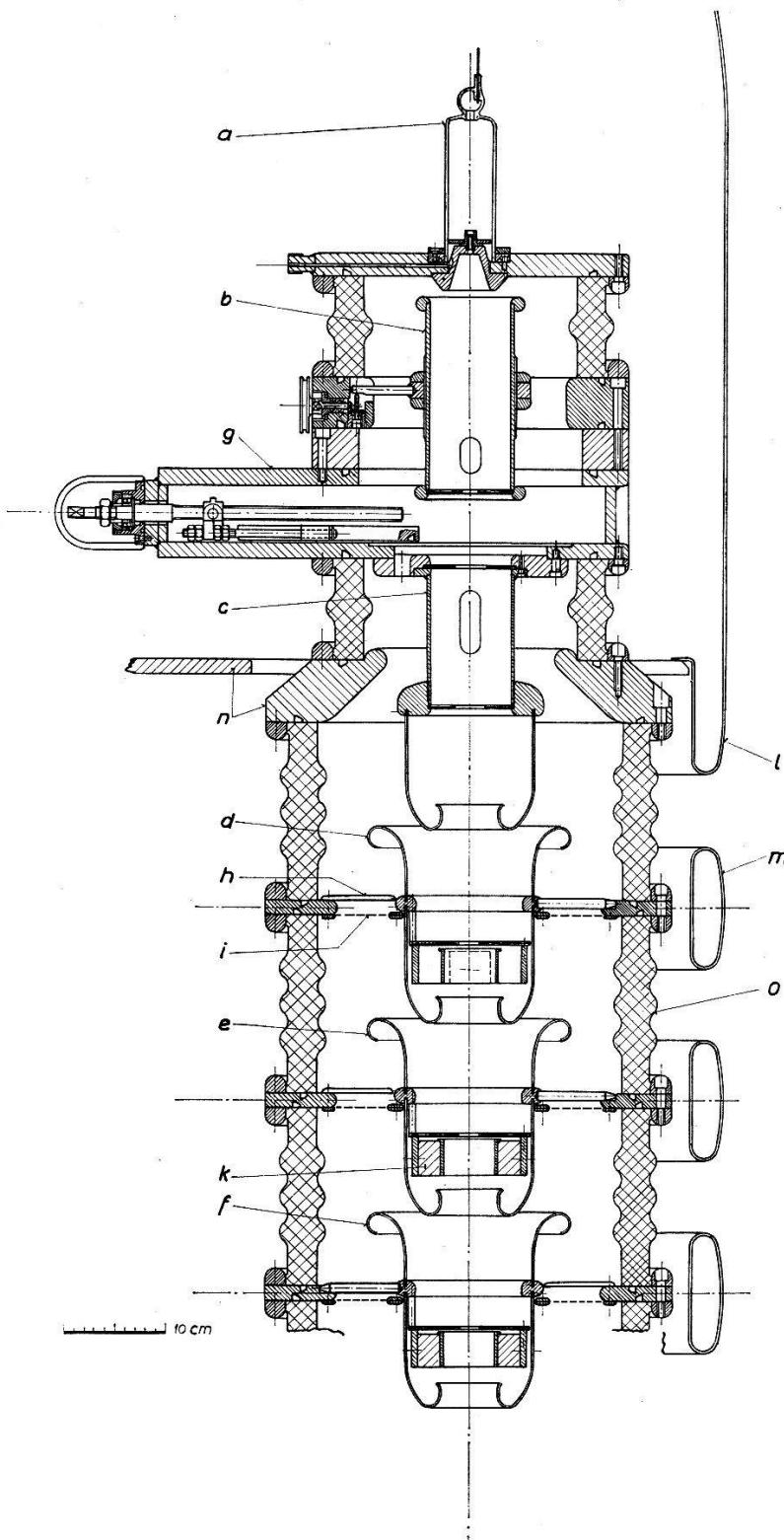
Das Beschleunigungsrohr enthält entsprechend der Kaskade 20 identische Stufen von je 19 cm Länge. Figur 1 zeigt die drei obersten Beschleunigungsstufen, die Fokussierungslinse und die Ionenquelle. Einzelne Rohrstufen wurden in einem Versuchsdruktank unter möglichst gleichen elektrischen Bedingungen wie in der Kaskade geprüft. Bei Porzellanisolatoren, die vakuumseitig glasiert waren, trat bei 200 kV Spannung längs der Zwischenringe ein Glimmlichtsaum auf. Die erreichten Durchbruchspannungen lagen dann bei 220 kV. Bei Porzellanisolatoren, die vakuumseitig sandgestrahlt waren, lag der beobachtete Glimmlichteinsatz nach einstündiger Formierung bei 260 kV. An die Stufe konnten dann Spannungen bis 290 kV angelegt werden (bei dieser Spannung erfolgten regelmässige Überschläge über die vorhandene Hochspannungsdurchführung). Nach 1½ stündiger Formierung trat kein Glimmlicht mehr auf bis zur jeweiligen Überschlagsspannung der Durchführung. Die Feststellung, dass vakuumseitiges Sandstrahlen der Isolatoren eine Verbesserung der elektrischen Festigkeit ergibt, ist in Übereinstimmung mit den Erfahrungen anderer Autoren<sup>3)</sup>.

Auf Erdpotential des 380 cm langen Rohres ist eine Öl-Diffusionspumpe mit Wasser- und Frigen-Baffle montiert. Die Sauggeschwindig-

---

\* Geliefert von Fa. Emil Haefely & Cie., Basel.

keit der Pumpe beträgt 1500 l/s bei  $10^{-4}$  Torr. Mit dem normalen Gas-einlass einer Hochfrequenzionenquelle<sup>4)</sup> erreicht man einen Betriebs-druck von  $2 \cdot 10^{-6}$  Torr am untern, bzw.  $10^{-5}$  Torr am oberen Rohrende.



- a) Hochfrequenz-Ionenquelle
- b) schwenbarer Teil der Linse.
- c) fester Teil der Linse (b und c besitzen die-selbe Linsenspannung).
- d) e) f) drei der 20 Be-schleunigungselektroden aus nichtrostendem Stahl.
- g) Vakuumplattenventil.
- h) Blende, die  $120^\circ$  des Beschleunigungsrohres abdeckt; Versetzung von Stufe zu Stufe  $90^\circ$ .
- i) Drahtnetze.
- k) Permanentmagnete mit Strahlblendern.
- l) Hochspannungshaube.
- m) Äquipotentialringe für den Hochspannungs-generator.
- n) Hochspannungstisch.
- o) Porzellanisolator, druckseitig glasiert, vakuumseitig sand-gestrahlt.

Fig. 1  
Querschnitt durch den oberen Teil des Beschleunigungsrohres

Typisch für das Beschleunigungsrohr ist, dass sich längs der Achse Beschleunigungsstrecken (zwischen den Elektroden) und feldfreie Strecken (innerhalb der Elektroden) abwechselungsweise folgen. In den feldfreien Räumen ergibt sich dadurch die Möglichkeit, Strahlblenden mit Permanentmagneten einzubauen<sup>5)</sup>. Die Permanentmagnete sollen die Anzahl der Sekundärelektronen, die nach oben beschleunigt werden, vermindern. In diesem Rohr wurden jeweils die Polarität und die Magnetfeldstärke (rund 50 Gauss über 5 cm Länge) so abgeglichen, dass der Ionenstrom jedesmal nach 4 aufeinanderfolgenden Stufen sich wieder in der Rohrachse befindet. Der Blendenöffnungs durchmesser beträgt 2 cm. Die Absaugspannung der Ionenquelle ist zwischen 0,5 kV und 4 kV regulierbar. Die Abmessungen der Fokussierungslinse wurden so berechnet, dass die Ionen durch Variation der Linsenspannung zwischen 10 kV und 60 kV bei Spannungen des Generators zwischen 0,5 MV und 4 MV fokussiert werden können. Die Berechnungen wurden nach der Matrizenmethode<sup>6)</sup> gemacht; diese erwies sich für die Lösung des Problems als genügend genau.

Figur 2 zeigt das ausgemessene Strahlprofil. Dieses ist für den ganzen Hochspannungsbereich charakteristisch. 70% des Stromes gehen durch eine Fläche von 12 mm<sup>2</sup>. Die Divergenz des Strahles ist klein. Bei bester Fokussierung in 1 m Distanz vom Rohrende vergrössert sich der Strahl durchmesser um 0,4 mm pro Meter Distanz. Die Divergenz ist erwartungsgemäss praktisch unabhängig von der Hochspannung. Der obere Teil der Fokussierungslinse ist über eine Dreipunktlagerung um die Rohrachse schwenkbar. Damit lässt sich eine Betriebsstellung finden, bei der sich die Strahlposition auf dem Target sehr wenig mit der Hochspannung ändert.

Die Wisconsin- und MIT-Gruppen, die sich mit elektrostatischen Beschleunigern befassen, entdeckten<sup>7)</sup> bei Beschleunigungsrohren, deren Öffnung grösser als 10 cm war, einen mit der Hochspannung sehr stark anwachsenden Belastungsstrom. Dieser machte solche Rohre für Spannungen oberhalb 2 MV unbrauchbar. Der Belastungsstrom ist auch bei nichtgezündeter Ionenquelle vorhanden und von Röntgenstrahlung begleitet. Schlechtes Vakuum im Rohr verhindert diese sogenannte Elektronenbelastung. Trotz des sehr grossen Durchmessers des vorliegenden neuen Rohres (der Innendurchmesser der Porzellan-Isolatoren beträgt 30 cm) tritt bis zur untersuchten Hochspannung von 3 MV ohne Ionenstrahl kein nachweisbarer Belastungsstrom und keine Röntgenstrahlung im Beschleunigungsrohr auf. Dies kann der Wirksamkeit der eingebauten Permanentmagnete zugeschrieben werden. Mit einem Ionenstrahl tritt auch in diesem Rohr Röntgenstrahlung auf, und zwar proportional der Ionenstromstärke. Damit treten bei genügend grossen Ionenströmen die

von den elektrostatischen Generatoren her wohlbekannten Betriebslimiten auf<sup>8</sup>). Die Röntgenstrahlung ionisiert das Druckgas. Neben dem zusätzlichen Belastungsstrom durch Druckgasionen können diese die Spannungsverteilung an Isolatoren so stark beeinflussen, dass Überschläge auftreten. Das Verhalten unserer Anlage wird schlecht mit Röntgenstrahlleistungen oberhalb 5–10 r/h, gemessen in 1 m Abstand vom Beschleunigungsrohr. Die Röntgenstrahlleistung ist ausserhalb des Drucktanks durch ein Schauglas gemessen worden. Die Angaben in dieser Arbeit wurden auf die Absorption des Tankes und des Schauglasses korrigiert. Die angegebenen Röntgenstrahlleistungen in r/h sind diejenigen, die in 1 m Abstand vom Beschleunigungsrohr im Druckgas gemessen würden.

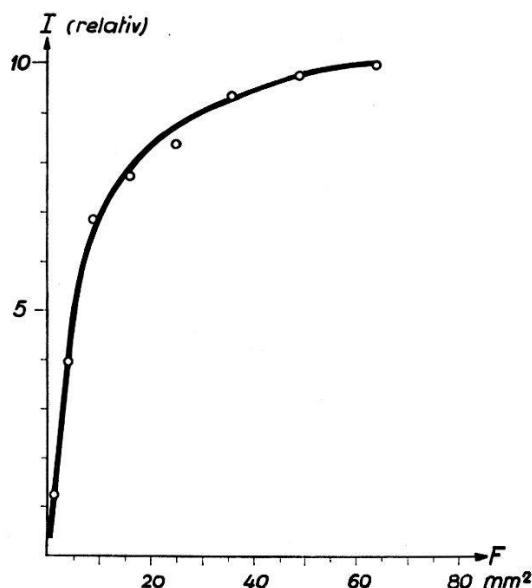


Fig. 2

Strahlprofil bei Fokussierung auf ein Target in 1,5 m Entfernung vom unteren Beschleunigungsrohrende. Aufgetragen ist der durch eine quadratische Fläche  $F$  hindurchtretende Strom  $I$ .

In Übereinstimmung mit einer Abschätzung aus der geometrischen Gestalt der Maschine ergab die Messung 100  $\mu\text{A}$  Ionisationsstrom vom Druckgas ( $10 \text{ ata N}_2 + 1 \text{ ata CO}_2$ ) für eine Röntgenstrahlleistung von 1 r/h in 1 m Abstand vom Beschleunigungsrohr. Da die möglichen Ionenströme dieser Röntgenstrahlung wegen limitiert sind, wurde deren Herkunft näher untersucht. Experimentell erweist sich die Röntgenstrahlintensität als proportional dem Ionenstrom und dem Gasdruck im Beschleunigungsrohr. Eine Lochkameraaufnahme auf Röntgenfilm (Fig. 3) zeigt als Ursprung der Röntgenstrahlung die Unterseiten der Beschleunigungselektroden und die Strahlblenden.

Die Elektronen entstehen durch die Ionisation des Restgases vom Strahl. Dies wurde auf Grund des folgenden Experimentes geschlossen: Bei konstantem Betrieb der Ionenquelle wurde durch das Vakuum- system Gas in das Beschleunigungsrohr eingelassen. Gemessen wurde die Zunahme der Röntgenstrahlleistung in 1 m Abstand vom Rohr als Funktion der Druckzunahme. In Figur 4 sind die Resultate für Lufteinlass

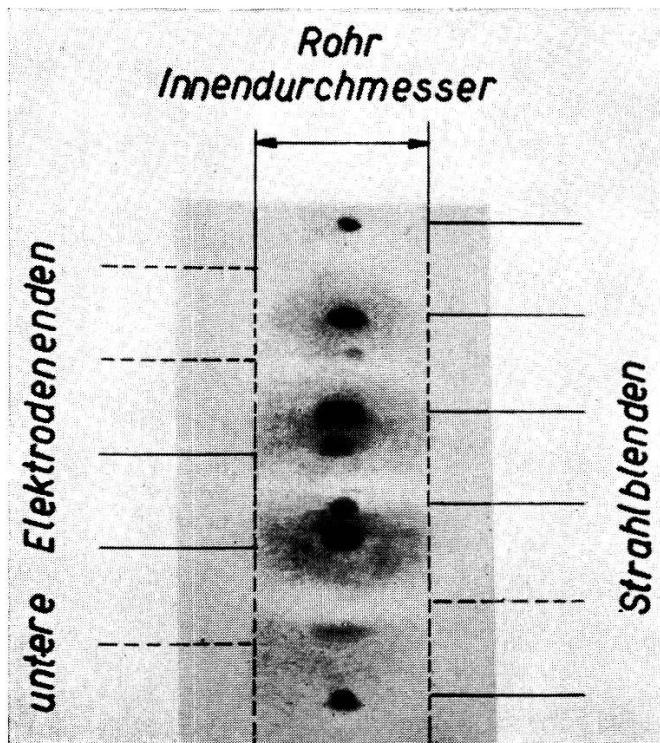


Fig. 3

Lochkameraaufnahme der Röntgenstrahlung von 6 Beschleunigungsstufen. Man erkennt durch die Streustrahlung den Porzellandurchmesser. Die Intensitätsunterschiede zwischen den Blenden und den Elektrodenunterseiten sind durch verschiedene Absorption des Rohres in den verschiedenen Richtungen verfälscht. Die Aufnahme wurde in 1 m Abstand vom Rohr gemacht.

bzw. Wasserstoffeinlass aufgetragen. Für beide Gase steigt die Röntgenstrahlung proportional mit der Druckzunahme. Bei gleichem Druck unterscheiden sich die gemessenen Röntgenstrahlleistungen des mit Luft- bzw. Wasserstoff gefüllten Rohres um einen Faktor 5. Dies ist in Übereinstimmung damit, dass die Anzahl erzeugter Ionen pro cm in diesen beiden Gasen sich um den Faktor 5 unterscheiden. Dadurch ist gezeigt, dass die Elektronen nicht durch das Auftreffen von gestreuten Protonen an Elektrodenteilen, sondern durch Ionisation im Restgas des Beschleunigungsrohres entstehen.

Aus der gemessenen mittleren Energie der Röntgenstrahlung kann geschlossen werden, dass die Elektronen im Mittel 2 bis 3 Beschleunigungsstufen durchlaufen. Eine theoretische Abschätzung des vorgeschlagenen Mechanismus ergibt die richtige Röntgenstrahlleistung. Je Meter Rohrlänge erhält man für den Leistungsbeitrag in 1 m Abstand vom Rohr die halbempirische Formel:

$$dD/dl = 4 \cdot 10^{-8} V^3 dE/dx \cdot \rho \cdot I$$

mit  $D$  in mr/h,  $V$  = Maschinenhochspannung in kV,  $dE/dx$  = Energieverlust der Strahlionen in keV/cm atm.,  $\rho$  = Druck im Beschleunigungsrohr in Torr,  $I$  = Ionenstrom in  $\mu\text{A}$ ,  $l$  = Rohrlänge in m.

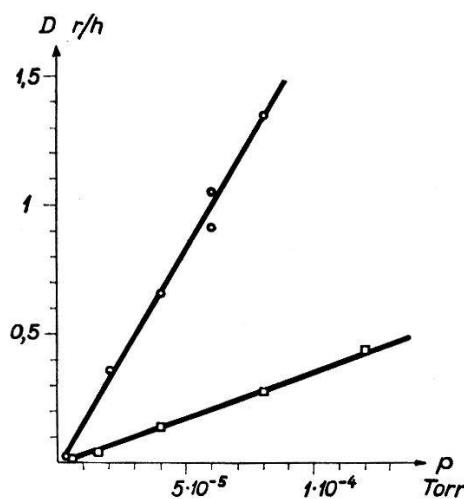


Fig. 4

Röntgenstrahlleistung  $D$  in 1 m Abstand vom Beschleunigungsrohr als Funktion des Gasdruckes im Rohr. Betrieb bei 2 MV und 40  $\mu\text{A}$  Protonenstrom.

- mit Lufteinlass in das Beschleunigungsrohr
- mit Wasserstoff im Beschleunigungsrohr

Die Erfahrungen mit diesem Rohr und der Kaskadenschaltung zeigen eine grosse Schwierigkeit. Wird erstmalig an ein neu aufgebautes Rohr Hochspannung angelegt, so treten ab 1,5 MV Gasausbrüche auf. Ab 2 MV sind solche Gasausbrüche oft von Rohrdurchschlägen begleitet. Nach jedem Durchschlag kann die Spannung schrittweise weiter erhöht werden. Diese Formierung erreichte mit ca. 100 Durchschlägen bei Spannungen um 2,5 bis 3 MV ein Maximum. Darauf war mit jedem Durchschlag eine Abnahme der erreichbaren Hochspannung zu beobachten. Bei einem solchen Durchschlag entladen sich die Kondensatorssäulen der Kaskade teilweise in das Beschleunigungsrohr und rufen dadurch schwere Beschädigungen auf den Elektrodenoberflächen hervor. Diese Beschädigungen bewirken eine permanente Röntgenstrahlung im Rohr, auch wenn keine

Ionen beschleunigt werden, wobei eine Druckerhöhung im Rohr diese Röntgenstrahlung stark vermindert. Die auftretenden Entladungsströme im Rohr betrugen bei den ersten Versuchen einige hundert Ampere, wobei in den Schubsäulen pro Stufe 14 Ohm Dämpfungswiderstände montiert waren. Ersatz dieser durch 800 Ohm Widerstände und Kopplung des Beschleunigungsrohres mit der Kaskade über eine Spule von  $100 \mu\text{H}$ y ergaben eine wesentliche Verbesserung der auftretenden Schäden. Es kann jetzt mit einem sicheren Rohrbetrieb bis wenigstens 2,8 MV gerechnet werden. Welche Grenzen sich mit diesen Verbesserungen erreichen lassen, ist noch nicht endgültig bestimmt. Der sehr wünschbaren weiteren Entkopplung des Beschleunigungsrohres von den Kondensator-säulen stehen technische Schwierigkeiten entgegen, die Gegenstand weiterer Untersuchungen sind.

### Literaturverzeichnis

- <sup>1)</sup> W. HEILPERN, Helv. Phys. Acta 28, 485 (1955); E. BALDINGER, Handbuch der Physik 44, 1 (1959).
- <sup>2)</sup> J. SEITZ, G. REINHOLD, R. MINKNER, Helv. Phys. Acta 33, 977 (1960).
- <sup>3)</sup> H. BRUCK und F. PREVOT (Saclay), Rapport C. E. A., Nr. 189.
- <sup>4)</sup> C. D. MOAK, H. REESE, W. M. GOOD, Nucl. 9/3, 18 (1951); R. BUDDE, P. HUBER, Helv. Phys. Acta 25, 459 (1952).
- <sup>5)</sup> A. STEBLER, P. HUBER, Helv. Phys. Acta 21, 59 (1948).
- <sup>6)</sup> U. TIMM, Z. Naturf. 10a, 593 (1955).
- <sup>7)</sup> R. G. HERB, Handbuch d. Physik 44, 64 (1955).
- <sup>8)</sup> C. M. TURNER, Brookhaven Nat. Lab., N. Y., Internal Report 1955.