

Elektronik und Kernphysik

Autor(en): **Baldinger, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **33 (1960)**

Heft [5]: **Supplementum 5. Beiträge zur Entwicklung der Physik**

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-513241>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Elektronik und Kernphysik

VON E. BALDINGER (Universität Basel)

Fast bei allen experimentellen physikalischen Untersuchungen spielen heute die elektronischen Hilfsmittel eine wesentliche und in der Bedeutung ständig wachsende Rolle. Allein die Anwendungen in der Kernphysik sind so zahlreich, dass schon vor längerer Zeit als Mass für die Leistungsfähigkeit eines kernphysikalischen Laboratoriums allen Ernstes die Zahl der pro Physiker verwendeten Radoröhren vorgeschlagen wurde [22]¹⁾.

Eine umfassende Darstellung der verschiedenen Anwendungen würde so umfangreich, dass sich die Beschränkung auf einige wenige Probleme als notwendig erweist. Offensichtlich wird eine solche Auswahl stark durch die persönliche Neigung des Autors und seine Erfahrungen beeinflusst, und die folgende kurze Übersicht will auch keineswegs den Anspruch auf eine gründliche und unabhängige Darstellung der Elektronik in der Kernphysik erheben, sondern nur eine Diskussion einiger Probleme bieten, in der Meinung, vielleicht anregende und nützliche Gedanken vermitteln zu können. Im besonderen liegt es mir am Herzen, auf die enge Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Anwendungsgebieten der Elektronik wie Nachrichtentechnik, Fernsehen, Radiotechnik und Kernphysik hinzuweisen. So hat zum Beispiel das Problem der Kernphysik, geladene Partikel nachzuweisen, zu verschiedenen bemerkenswerten Fortschritten der Elektronik angeregt. Dies mag seine Ursache in der Tatsache haben, dass selbst energiereiche Teilchen nur recht bescheidene Signale erzeugen. Die Beobachtung und Auswertung solcher Messungen verlangt öfters die bestmögliche Messgenauigkeit. So haben die Kernphysiker erwähnenswerte Beiträge zum Studium des Störpegels in den von ihnen verwendeten Schaltungen und allgemein in physikalischen Messinstrumenten geleistet und ferner zur Entwicklung sehr präziser Verstärker, Impulshöhenanalysatoren und ausgezeichnet stabilisierter Spannungs- und Stromquellen wesentliches beigetragen.

¹⁾ Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis, Seite 108.

1. Der lineare Verstärker als ballistisches Galvanometer

Zunächst soll auf ein altes Problem der Elektronik hingewiesen werden. Bereits im Jahre 1926 hat H. GREINACHER [13] als erster gezeigt, dass sich mit Hilfe einer Ionisationskammer und eines Röhrenverstärkers die von einzelnen Korpuskeln erzeugte Ionisation nachweisen lässt. Für die ältere Literatur kann die Monographie von SCHINTELMEISTER empfohlen werden. SCHINTELMEISTER [26] erblickt mit Recht die Bedeutung der Arbeiten GREINACHERS darin, dass er den experimentellen Nachweis für die Brauchbarkeit dieser Methode erbrachte. Von einer präzisen Messung der Zahl der erzeugten Ionenpaare konnte damals noch nicht gesprochen werden. Die Gründe hierfür gehen aus den späteren Arbeiten von G. ORTNER, G. STETTNER [24] und WYNN WILLIAMS [29] hervor, und ausserdem wurden die Mängel der ersten Apparatur eingehend nochmals von L. ÜRMÉNYI [28], einem Schüler GREINACHERS behandelt.

Es ist vielleicht nützlich, die damaligen Schwierigkeiten kurz zu erwähnen. Wie bereits bemerkt, sind die nachzuweisenden elektrischen Signale so klein, dass die Eigenschaften der ersten Verstärkerröhre einer sorgfältigen Abklärung bedürfen. Ferner soll der Verstärkungsgrad zeitlich konstant und die Ausgangsspannung des Verstärkers streng proportional zur Ladung sein, welche auf der Auffängerelektrode der Ionisationskammer eintrifft, Forderungen, die sich nur durch geschickte Verwendung des bekannten Prinzips der Gegenkopplung realisieren lassen. Eine schöne Lösung dieses Problems setzte aber eine Reihe zusätzlicher Erkenntnisse über rückgekoppelte Verstärker voraus, ein Gebiet, das vor allem in der Nachrichtentechnik gepflegt worden ist. Als Marksteine dieser Entwicklung darf auf die grundlegenden Arbeiten von NYQUIST [23] (Stabilitätskriterien in einer für Verstärker brauchbaren Form), sowie die Untersuchungen BODES [8] über die realisierbaren Netzwerke und die Abschätzung der Grenzeigenschaften gegengekoppelter Verstärker hingewiesen werden. Ein weiteres in der damaligen Zeit zunächst ungelöstes Problem betraf die Eichung einer solchen Messeinrichtung. So hat zum Beispiel E. RAMELET [25] versucht, die Ladungseichung durch geladene Tröpfchen vorzunehmen, während später allgemein die Eichung mit Hilfe von Influenzladungen erfolgte. Solche Influenzladungen wurden mit Hilfe von Spannungssprüngen, erzeugt durch Tasten einer Widerstandskapazitätsanordnung, erhalten. Spätere Anordnungen [4, 16, 26] bevorzugten eine geeignete Röhrenschialtung. Um einen besonders raschen Anstieg zu gewährleisten, dienten schon damals quecksilbergefüllte Schaltröhren ([26] S. 158), wie sie heute erneut, wenn auch mit gewissen Modifikationen, in der Millimikrosekunden-Technik benützt werden.

Ein weiteres, für Anwendungen in der Kernphysik spezifisches Problem liegt darin, den günstigsten Frequenzgang eines Verstärkers unter Berücksichtigung des Störpegels der 1. Röhre und des Untergrundes zum

Beispiel durch γ -Strahlen oder Rückstosskerne zu ermitteln [6]. Eine hübsche, damals wenig beachtete Lösung wurde von ALFVÉN [2] in der Zeitschrift für Physik sehr frühzeitig gegeben. Unabhängig davon kam später ELMORE [10] zu ähnlichen und teilweise weiterführenden Ergebnissen. Heute ist man in der Lage, die Eigenschaften des bestmöglichen Verstärkers eindeutig anzugeben, so dass in einfacher Weise entschieden werden kann, ob sich in einem konkreten Fall der mit einer Verbesserung verbundene Mehraufwand überhaupt lohnt [15, 5, 6].

Als interessantes Resultat solcher Untersuchungen soll festgehalten werden, dass Messeinrichtungen, die in langjähriger Praxis verbessert wurden und sich schliesslich bewährt haben, fast immer den optimalen Bedingungen recht nahe kommen, ein Ergebnis, das auch in der Nachrichtentechnik durch die Informationstheorie seine Bestätigung fand. Der Vorteil der heutigen theoretischen Betrachtungsweise liegt eigentlich darin die vielen «Kochrezepte» und Erfahrungen, in einfacher und verständlicher Weise ordnen zu können. Erst diese Übersicht erlaubt es, die gewonnenen Erkenntnisse sinngemäss auf neue Probleme anzuwenden und die früher zwangsläufig erfolgten Umwege zu vermeiden, ganz abgesehen davon, dass bei verwickelteren Problemen der frühere, mehr empirische Weg ausserordentlich mühsam wird.

Diese kurzen Hinweise mögen zeigen, dass selbst der Bau einer für heutige Verhältnisse einfachen Einrichtung Kenntnisse aus einer Reihe sehr verschiedener Gebiete verlangt, und dass nur ein Teil der Probleme typisch für eine kernphysikalische Anwendung ist. Erst die Kombination verschiedenartiger Erkenntnisse kann zu wirklich guten Lösungen führen.

Angeregt durch die Arbeiten GREINACHERS wurde diese Methode bald auch im physikalischen Institut der ETH vielfach zur Untersuchung von Kernreaktionen und den Problemen der Radioaktivität angewendet.

2. Zur systematischen Behandlung des «ballistischen Verstärkers»

Bei jedem messtechnischen Problem der erwähnten Art scheint es mir wichtig, zunächst zu einem tieferen Verständnis des benützten Prinzips, das heisst zu einer Abklärung der grundsätzlichen Fragestellung zu gelangen. Die Informationstheorie vermittelt dazu manche Anregungen und führt oft zu klareren Vorstellungen über die zu lösende Aufgabe.

Die von GREINACHER eingeführte Messanordnung soll – ähnlich wie das ballistische Galvanometer – die Messung von Ladungen gestatten. Wir dürfen deshalb den Verstärker mit Recht als ein verallgemeinertes ballistisches Galvanometer auffassen, das die Ladung der in der Ionisationskammer erzeugten, kurzzeitigen Stromstösse nachzuweisen hat. Der Verstärker besitzt, verglichen mit dem Galvanometer, den grossen Vorteil eines leicht einstellbaren Frequenzganges, der sich den experimentellen Bedingungen in einer mit rein mechanischen Mitteln nicht möglichen Art

und Weise anpassen lässt. Der Frequenzgang soll nun derart gewählt werden, dass einerseits die ballistische Messung der Ladung mit ausreichender Genauigkeit gewährleistet ist (kleiner ballistischer Fehler) und andererseits der Einfluss des Störpegels so gering wie möglich wird. Diese zunächst etwas unbestimmte Formulierung lässt sich folgendermassen in Teilprobleme aufspalten, welche dann einer strengen und verhältnismässig einfachen Behandlung zugänglich sind:

a) Die Stromstösse der Ionisationskammer werden als beliebig kurzzeitig, das heisst als δ -Stösse angesehen. Frage: Wie kann die Ladung dieser δ -Stösse unter Berücksichtigung des Störpegels am besten gemessen werden?¹⁾

Der Störpegel selbst setzt sich zusammen aus der Wärmebewegung der Elektronen des Eingangskreises, den Schwankungserscheinungen der ersten Röhre sowie aus dem Untergrund verursacht durch γ -Strahlung, Rückstosskerne usw., welcher in der Ionisationskammer ebenfalls kurze Stromstösse erzeugt. Die zuletzt erwähnte Störung zeigt sofort, dass die beste Einstellung des Verstärkers von den experimentellen Gegebenheiten abhängt und der Verstärker je nach Experiment einer verschiedenen Einstellung bedarf.

b) Der Stromstoss der Ionisationskammer besitzt eine endliche und von Fall zu Fall verschiedene Zeitdauer. Frage: Welcher Fehler entsteht bei der Messung durch die endliche Zeitdauer des Eingangssignales (ballistisches Defizit)?

c) Einfluss der Überlagerungen (Zeitliches Auflösungsvermögen).

Das Ergebnis solcher Studien zeigt, dass der relative ballistische Fehler im allgemeinen von der Form

$$A = 1 + \alpha \left(\frac{T}{\tau} \right)^2$$

ist, wobei T ein Mass für die Zeitdauer des Stromstosses und τ ein Mass für die im Verstärker für einen δ -Stoss erzeugte Zeitdauer des Ausgangssignals darstellt. Eine bekannte und passende Änderung des Frequenzganges des Verstärkers (zum Beispiel Änderung der Zeitkonstante eines RC-RC-Verstärkers) gestattet unmittelbar die Messung des ballistischen

¹⁾ Diese Fragestellung lässt sich sofort allgemeiner stellen und lösen, nämlich: Das zu beobachtende Signal sei von der Form $y = A \cdot s(t)$, wobei $s(t)$ eine bekannte Funktion der Zeit darstellt. Die Grösse A ist möglichst exakt zu bestimmen, wobei das Fourier-Spektrum des Störpegels – also der überlagerten Schwankungserscheinungen – ebenfalls als bekannt vorausgesetzt wird. Offensichtlich würde eine Lösung dieses Problems darin bestehen, das Ausgangssignal eines Verstärkers formgetreu aufzuzeichnen und mit einer passenden Fehlerrechnung den besten Wert für A zu ermitteln. In solchen Fällen ist es immer möglich, eine einfache Schaltung zu finden, welche gerade diese Rechnung in guter Näherung selbsttätig ausführt und den so bestimmten Wert für A in der Form eines Zeigerausschlages oder einer Zahl notiert.

Fehlers. Erst mit dieser Korrektur ist es sinnvoll, zum Beispiel die Sättigungskurve einer Ionisationskammer zu bestimmen. Die richtige Anwendung solcher Korrekturen zeigt, dass die alte Theorie von JAFFÉ [17] über Rekombinationen von Ladungsträgern in Kolonnen (erzeugt durch geladene Partikel) die experimentellen Ergebnisse erstaunlich gut wiedergibt [5, 30].

3. Registrierung der Ausschläge am Verstärkerausgang und Automatisierung der Ablesung und Auswertung

Vor dem letzten Weltkriege wurde üblicherweise die Höhe der Ausschläge des Verstärkers mit Hilfe eines Schleifenoszillographen auf Papierstreifen photographisch festgehalten und die so erhaltenen Stricke mühsam «von Hand» ausgemessen [3, 26]. Es ist wohl selbstverständlich, dass jeder, der Tausende solcher Ausschläge ausgewertet hat, unmittelbar den Wunsch äussert, diese Arbeit einer automatischen Einrichtung zu überlassen. So wurde auch in Zürich im engeren Kreise diese Frage öfters diskutiert. Der damalige Stand der Technik war jedoch nicht dazu angetan, die Konstruktion eines komplizierten Impulshöhenanalysators zu empfehlen. Hingegen fanden einfache Amplitudendiskriminatoren mit einstellbarem Ansprechpegel wohl Verwendung [27]. Mit den grossen technischen Fortschritten der Elektronik änderte sich die Lage sehr rasch, und gegen Ende des letzten Weltkrieges waren solche Wünsche erfüllbar. Auch in der Schweiz wurde in der Folge dieses Problem in Angriff genommen, wobei insbesondere die Arbeiten von MAEDER [18–21] am Zürcher Institut zu erwähnen sind, der als erster die photographische Methode zur Registrierung komplizierter Amplitudenverteilungen zu einem sehr brauchbaren Verfahren entwickelte.

Ganz allgemein darf festgestellt werden, dass die Tendenz besteht, immer komplexere, automatisch arbeitende Auswerteeinrichtungen auch im kernphysikalischen Laboratorium zu benützen. Es erscheint heute möglich, jede Tätigkeit unseres Geistes, die sich in logischer und rationaler Weise formulieren lässt, von Maschinen ausführen zu lassen. Auch unsere Laboratoriumstätigkeit wird in naher Zukunft stark von solchen Gesichtspunkten beeinflusst sein. Insbesondere die Fortschritte der Halbleiterphysik und damit verknüpft die Erfindung des Transistors und weiterer ähnlicher Hilfsmittel öffnen in dieser Hinsicht ein grosses Anwendungsgebiet für die nächste Zukunft. Um verwickelte und gleichzeitig betriebssichere Maschinen bauen zu können, sind an die Schaltelemente strenge Forderungen zu stellen. Wir müssen insbesondere verlangen, dass die Schaltelemente eine lange Lebensdauer aufweisen, dass sie unempfindlich gegenüber mechanischen Erschütterungen sind, und dass sie wenig Raum beanspruchen. Man rechnet damit, in nächster Zeit bis zu rund 30000 Schaltelemente in einem dm^3 unterbringen zu können.

Wir müssen weiter verlangen, dass diese Schaltelemente ihre Funktion mit einem geringen Energieaufwand ausüben können. Ein grosser Energieverbrauch bedeutet grosse Wärmeproduktion, grosse Abmessungen und bedeutet in der Regel eine starke Reduktion der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer des Apparates.

Um den Fortschritt zu demonstrieren, welcher in der eben erwähnten Richtung mit Transistoren möglich ist, sei eine duale Untersetzstufe mit einem Auflösungsvermögen von einigen Millionen Impulsen pro Sekunde betrachtet. Eine übliche Röhrenanordnung benötigt etwa 5 W pro Stufe, während die Transistorschaltung mit 0,005 W auskommt. In einem wirklich ausgeführten Gerät wird der Gewinnfaktor im allgemeinen kleiner sein. Aber auch eine Leistungsreduktion auf den 50. Teil, die stets im Bereiche des Möglichen liegt, eröffnet technisch recht interessante Perspektiven.

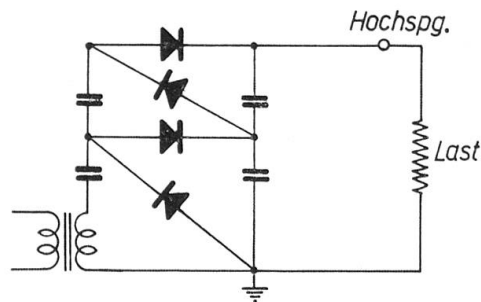
4. Bemerkungen zu Kaskadengeneratoren

Im Jahre 1920 hat H. GREINACHER [12] in einer allgemeinen Betrachtung Schaltungen angegeben, die zur Erzeugung hoher Gleichspannungen sehr geeignet sind.

Diese Arbeiten gehen auf die Entwicklung des Ionometers, eines Apparates zur Messung der Ionisation von Radium und Röntgenstrahlen, zurück. Die notwendige Spannung von einigen 100 Volt sollte auf möglichst einfache Art aus dem Lichtnetz erzeugt werden. In diesem Zusammenhange muss daran erinnert werden, dass zur damaligen Zeit noch keine Elektronenröhren als Ventile zur Verfügung standen. Verwendet wurden «Graetzsche Zellen», die aus einer Aluminium- und einer Eisen- elektrode in einer NaHCO_3 -Lösung als Elektrolyt bestanden und eine Sperrspannung von nur etwa 30 Volt aufwiesen. Die von H. GREINACHER angegebenen Schaltungen blieben lange Zeit unbeachtet, bis 1930 J. D. COCKCROFT und E. T. S. WALTON mit ihren Versuchen zur künstlichen Erzeugung von Kernumwandlungen begannen und in diesem Zusammenhang im Jahre 1932 über einen Kaskadengenerator von 800 kV Gleichspannung berichteten [9]. Bald darauf sind auch am Zürcher Institut ähnliche Untersuchungen in Angriff genommen worden. So baute ALEXOPOULOS [1] mit sehr bescheidenen Mitteln aus alten Röntgentransformatoren und alten Röntgenröhren eine Greinacherschaltung auf. Als wir einen solchen Transformator später reparieren mussten, stellten wir zu unserem Erstaunen fest, dass, um Transformatorenöl zu sparen, der leere Raum im Transformatorgehäuse mit Glasscherben ausgefüllt war!

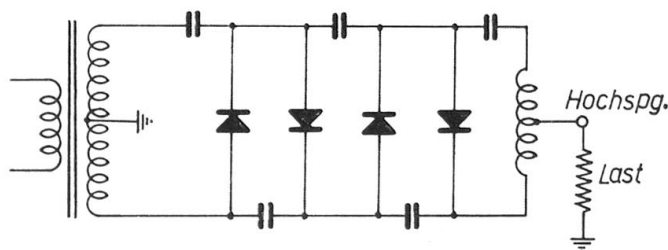
Die in Figur 1 dargestellte ursprüngliche Konzeption des Kaskadengenerators weist verschiedene Nachteile auf. Die unvermeidlichen Streukapazitäten zwischen den beiden Kondensatorsäulen erzeugen bereits im Leerlauf einen Spannungsabfall und ausserdem eine der Gleichspannung

überlagerte Rippelspannung. Durch die Streukapazitäten fließen besonders bei hoher Frequenz der Wechselspannung beträchtliche Ströme. Andererseits lassen sich die Kondensatoren nur bei hoher Betriebsfrequenz in ihren Abmessungen genügend klein halten, ganz abgesehen davon ist es im allgemeinen erwünscht, dass die in den beiden Kondensatorsäulen aufgespeicherte elektrische Energie klein ist. Eine hübsche Lösung des Problems ist in Figur 2 dargestellt. Wegen der symmetrischen Anordnung erzeugen die Wechselströme durch die Streukapazitäten keine Rippelspannung an den Ausgangsklemmen. Ausserdem gestattet die Spule zwischen den beiden Hochspannungsklemmen den Spannungsabfall infolge der Streukapazitäten teilweise zu kompensieren. Eine solche symmetrische Anordnung erlaubt es ferner, den Kaskadengenerator als einfache, aus gleichen Gliedern zusammengesetzte elektrische Leitung aufzufassen und so zu einer übersichtlichen rechnerischen Behandlung des Systems zu gelangen.



Figur 1

Kaskadengenerator nach H. GREINACHER



Figur 2

Kaskadengenerator nach E. EVERHART und P. LORRAIN [Rev. Sci. Instr. 24, 221 (1953)]

Die konsequente Weiterführung des Gedankens führt dazu, den einzelnen Stufen des Kaskadengenerators die Struktur eines Bandfilters zu erteilen, wobei die Frequenz der Wechselspannung etwa in der Mitte des Durchlassbereiches der so erhaltenen Filterkette liegen soll. Die Schaltkapazitäten sowie die Induktivitäten der Seriendensatoren und der Verdrahtung bilden nun Bestandteile des Filters und sind infolgedessen nicht mehr störend.

Die Theorie solcher Kaskadengeneratoren liesse sich in enger Anlehnung an die in der Nachrichtentechnik übliche näherungsweise Behandlung von Filtern mit Verlusten aufbauen [7]. Dieses Beispiel zeigt erneut die engen Beziehungen zwischen den verschiedenen Ingenieurwissenschaften und der Physik.

Selbstverständlich ist nicht zu vergessen, dass die Elektronik für die Kernphysik zwar ein sehr wertvolles Hilfsmittel, jedoch keinen Selbstzweck darstellt. Andererseits vermeidet gerade die enge Verbindung der verschiedenen Fachgebiete eine allzustarke Spezialisierung und lässt so das Wesentliche stärker hervortreten. Dadurch gewinnt die Elektronik auf dem Gebiet der Kernphysik einen eigenen und anregenden Charakter.

Wie schon eingangs bemerkt, ist die Auswahl der hier erwähnten elektronischen Probleme der kernphysikalischen Messtechnik mehr oder weniger stark durch die persönlichen Interessen und Erfahrungen des Autors bedingt. Andererseits wurden gerade diese Fragestellungen im physikalischen Institut der ETH immer wieder zur Diskussion gestellt und ihre Bearbeitung durch Mitarbeiter unseres verehrten Lehrers, Herrn Prof. Dr. P. SCHERRER, hat im Laufe der Jahre zu mancher neuartigen und vielbeachteten Lösung geführt.

LITERATUR

- [1] ALEXOPOULOS, K. D., *Helv. phys. Acta* 8, 601 (1935); Diss. ETH (1935).
- [2] ALFVÉN, H., *Z. Phys.* 99, 24, 714 (1936).
- [3] BALDINGER, E., HUBER, P., und STAUB, H., *Helv. phys. Acta* 11, 245 (1938).
- [4] BALDINGER, E., und HUBER, P., *Helv. phys. Acta* 12, 330 (1939).
- [5] BALDINGER, E., und HAEBERLI, W., *Impulsverstärker und Impulsspektrographen*. *Ergeb. exakt. Naturwiss.* 27, 248 (1953).
- [6] BALDINGER, E., und FRANZEN, W., *Amplitude and Time Measurement in Nuclear Physics*. *Adv. in Electronics and Electron Physics*, 8, 255 (1956).
- [7] BALDINGER, E., *Kaskadengeneratoren*. *Hd. Buch der Physik*, Band XLIV, 1. Springer-Verlag 1959.
- [8] BODE, H. W., *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. New York, D. van Nostrand Co. 1945.
- [9] COCKCROFT, J. D., and WALTON, E. T. S., *Proc. Roy. Soc. London, Serie A.* 136, 619 (1932).
- [10] ELMORE, W. C., *Nucleonics* 2, Nr. 2, Nr. 3, Nr. 4, Nr. 5 (1948).
- [11] ELMORE, W. C., and SANDS, M., *Electronics, Experimental Techniques*. MacGraw-Hill Book Co. 1949, New York.
- [12] GREINACHER, H., *Bulletin SEV, Schweiz. Elektrotechn. Verein* 11, 59 (1920).
- [13] GREINACHER, H., *Z. Phys.* 36, 364 (1926).
- [14] GREINACHER, H., *Z. Phys.* 44, 319 (1927); *Helv. phys. Acta* 1, 534 (1928) vgl. auch RAMELET, E., *Helv. phys. Acta* 1, 296 (1928).
- [15] HALBACH, K., *Helv. phys. Acta* 26, 65 (1953).
- [16] HUBER, P., *Helv. phys. Acta* 14, 163 (1941).
- [17] JAFFÉ, G., *Ann. Phys.* 42, 303 (1913).
- [18] MAEDER, D., *Helv. phys. Acta* 20, 139 (1947);
MAEDER, D., HUBER, P., und STEBLER, A., *Helv. phys. Acta* 20, 230 (1947).

- [19] MAEDER, D., *Helv. phys. Acta* 28, 356 (1955).
- [20] MAEDER, D., *Helv. phys. Acta* 29, 459 (1956).
- [21] MAEDER, D., *Helv. phys. Acta* 30, 347 (1957).
- [22] MOODY, N. F., HOWELL, W. D., BATTEL, W. J. and TAPLIN, R. H., *Rev. Sc. Instr.* 22, 439, 551 (1951).
- [23] NYQUIST, H., *Bell Syst. Techn. J.* 11, 126 (1932).
- [24] ORTNER, G., und STETTER, G., *Z. Phys.* 54, 449 (1929).
- [25] RAMELET, E., *Ann. Phys.* 86, 871 (1928); *Helv. phys. Acta* 1, 296 (1928).
- [26] SCHINTELMEISTER, J., *Die Elektronenröhre als physikalisches Messgerät*. Springer-Verlag, Wien 1943, 2. Auflage.
- [27] STAUB, H., und STEPHENS, W. E., *Phys. Rev.* 55, 132 (1939).
- [28] ÜRMÉNYI, L., *Helv. phys. Acta* 10, 285 (1937).
- [29] WYNN-WILLIAMS, C. E., und WARD, F. A. B., *Proc. Roy. Soc. London (A)* 131, 391 (1931).
- [30] WIDDER, F., und HUBER, P., *Helv. phys. Acta* 31, 601 (1958).