

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 41 (1950)
Heft: 12

Artikel: Moderne Verfahren zur elektrischen Leistungsverstärkung
Autor: Strutt, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058916>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

[16] *Hadamard, J.*: A propos des notions de dimension et d'homogénéité. J. Phys. Radium, 6. Ser., Bd. 3(1922), S. 149...153.
 [17] *Wennerberg, J.*: A study of physical quantities in mechanical and electrical engineering. Stockholm, The Swedish Electrotechnical Committee, 1932.
 [18] *Lartigue, A.*: Discussion du rapport de M. Iliovici sur les unités. Bull. Soc. franç. Electr. 5., Ser., Bd. 5(1935), Nr. 51, S. 279.
 [19] *Brylinski, E.*: Sur la notion d'angle. Rev. Gén. Electr. Bd. 44(1938), Nr. 11, S. 345...349.

[20] *Weyl, H.*: Raum, Zeit, Materie. 5. Aufl. Berlin, Springer, 1923.
 [21] *Bouthillon, L.*: Sur la nature des grandeurs électriques et magnétiques et l'application de la notation tensorielle aux lois de l'électricité. Bull. Soc. franç. Electr., 5. Ser., Bd. 8(1938), S. 41...62.
 [22] *Brillouin, L.*: Les tenseurs en mécanique et en élasticité. Paris, Masson, 1944.

Adresse des Auteurs:

Prof. Max Landolt, Direktor des Technikums des Kantons Zürich, Büelweg 7, Winterthur (ZH).

Moderne Verfahren zur elektrischen Leistungsverstärkung

Von M. Strutt, Zürich¹⁾

621.396.64

Nach einer Erörterung des Begriffes der Leistungsverstärkung in der Elektrotechnik wird der Gewinn definiert als Verhältnis der verfügbaren Leistung am Ausgang zu jener am Eingang eines Verstärkers. Dieser Gewinn hängt bei linearen Verstärkern von den Matrixelementen ab und wird für einen einfachen Vierpol angegeben. Als erste Anwendung werden Elektronenröhrenverstärker behandelt, als zweite Anwendung Verstärker ohne Elektronenröhren und zwar mit Halbleitern, ferner magnetische Verstärker und Maschinenverstärker.

Après une discussion de la notion d'amplification de puissance, le gain est défini comme quotient de la puissance disponible à la sortie et de la puissance disponible à l'entrée d'un étage amplificateur. Ce gain dépend des éléments de la matrice de l'amplificateur et il est calculé pour un quadripôle simple. Ces définitions sont alors appliquées aux amplificateurs comportant des tubes électroniques. Des amplificateurs sans tubes électroniques des types suivants sont discutés: les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs magnétiques et les amplificateurs à machines électriques.

1. Begriff der Leistungsverstärkung

Bei der Neuausrüstung des Elektrotechnischen Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), welche jetzt den Anfang genommen hat, wird den Gebieten der elektrischen Messtechnik, der Gasentladungen, der Elektronik, der elektrischen Maschinen und der Hochspannungstechnik besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Hier möchten wir ein Leitmotiv hervorheben, das geeignet erscheint, viele der genannten Arbeiten unter einheitlichen Gesichtspunkten zu betrachten, und zwar den Begriff der *Leistungsverstärkung* in der Elektrotechnik. Diese Leistungsverstärkung benutzt immer eine Hauptleistungsquelle, deren abgegebene Leistung (Speiseleistung) nach gebührender Umformung von einer Nebenleistungsquelle (Eingangsquelle) gesteuert wird. Man kann die Wirkung der Anlage so beschreiben, dass die Ausgangsleistung ein nach gegebenem Muster geformtes Bild der Eingangsleistung ist. Weil die Ausgangsleistung in vielen Fällen bedeutend grösser ist als die Eingangsleistung, kann man sagen, es finde eine Leistungsverstärkung vom Eingang zum Ausgang statt.

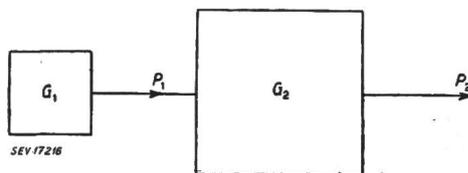


Fig. 1

Schema eines Leistungsverstärkers

G₁ Nebenleistungsquelle; G₂ Verstärker mit Hauptleistungsquelle; P₁ Eingangsleistung; P₂ Ausgangsleistung

In besonderen Fällen kann die Hauptleistungsquelle fortfallen. Dann findet im Verstärker infolge der Verluste der Schaltung eine Schwächung der Eingangsleistung statt, welche als Verstärkung < 1

bezeichnet werden kann. Damit fallen alle Leistungsübertrager (z. B. Leitungen, Transformatoren) unter den Begriff der Leistungsverstärker.

In den einfachsten Fällen der Verstärkung sind die Ströme und Spannungen am Ausgang proportional zu den Strömen und Spannungen am Eingang. Solche Verstärker sind linear oder fast linear. Meistens gilt dies für einen beschränkten Strom- und Spannungsbereich. Ein linearer Verstärker kann *n* Eingangsklemmen und *m* Ausgangsklemmen haben. In einfachen Fällen ist *m* = *n* und das Verhalten des Verstärkers wird dann im linearen Falle durch eine quadratische Matrix mit *n* Zeilen und Spalten beschrieben. Die Matrixelemente sind von den Strömen und Spannungen unabhängig. Die Ströme und Spannungen am Ausgang können auch bei linearen Verstärkern von den entsprechenden Eingangsgrössen abweichende Frequenzen haben. Die Matrizenrechnung bildet zur Behandlung aller solcher Verstärker ein bequemes Hilfsmittel. Es empfiehlt sich, bei linearen Leistungsverstärkern den Begriff der *verfügbaren Leistung* einer Quelle einzuführen. Dies ist die maximale Leistung, welche einer Quelle entnommen werden kann. Das Verhältnis der verfügbaren Leistung am Ausgang zu jener am Eingang eines Verstärkers ist der Gewinn *g_v* (*v* = verfügbar). Wenn die Eingangsquelle ihre ganze verfügbare Leistung an den Verstärker abgibt, wird der Gewinn maximal. Man kann den Gewinn aus der Verstärkermatrix im linearen Fall berechnen.

Als einfaches Beispiel wählen wir einen Vierpolverstärker mit zwei Eingangs- und zwei Ausgangsklemmen. Die entsprechende Admittanzmatrix lautet:

$$\begin{vmatrix} \mathfrak{Y}_{11} & \mathfrak{Y}_{12} \\ \mathfrak{Y}_{21} & \mathfrak{Y}_{22} \end{vmatrix}$$

Wenn $\mathfrak{Y}_{12} = 0$ ist, haben wir einen Richtvierpol vor uns, bei dem der Gewinn vom Eingang zum Aus-

¹⁾ Antrittsvorlesung, gehalten an der Eidgenössischen Technischen Hochschule am 2. Juli 1949.

gang endlich, in umgekehrter Richtung aber Null ist. Für einen solchen Richtvierpol ergibt sich bei reellen Admittanzen:

$$g_{v \max} = \frac{Y_{21}^2}{4 |Y_{11} Y_{22}|}$$

Offenbar kommt es bei der Beurteilung des Gewinns auf die Kenntnis der vier Vierpoladmittanzen an. Analoges gilt bei Mehrpolen.

In den meisten Fällen sind wir auf Messungen angewiesen, um die Matrixelemente zu bestimmen. Diese Messungen werden dann in einem bestimmten Frequenzbereich ausgeführt.

In manchen Fällen ist die Verstärkung rasch veränderlicher Vorgänge erforderlich (Stossverstärkung). Die Kenntnis der Matrixelemente, sogar in einem weiten Frequenzbereich, ist zur Beurteilung der Stossverstärkung oft ungenügend. Gesonderte Messungen der Stossverstärkung sind in solchen Fällen angezeigt.

2. Anwendungen auf Elektronenröhrenverstärker

Zur Erläuterung dieser Ausführungen möchte ich einen Ausschnitt aus meinen eigenen Arbeiten der vergangenen Jahre erwähnen. Zu Anfang der dreissiger Jahre hatte sich herausgestellt, dass der Gewinn von Elektronenröhrenverstärkern bei wachsender Frequenz stark sinkt. Als Ursache wurden von anderer Seite die mit der Elektronensteuerung verbundenen Trägheitserscheinungen angegeben,

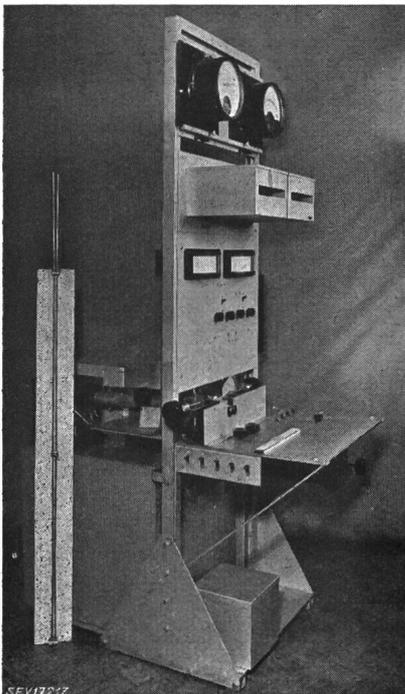


Fig. 2

Vorrichtung zur Messung der Verstärkereigenschaften von Elektronenröhren bis etwa 300 MHz

und durch Einführung entsprechender Röhrenkonstruktionen mit kleineren Elektrodenabständen wurden Verbesserungen erreicht, die aber unbefriedigend blieben.

Als meine früheren Mitarbeiter und ich uns mit diesen Fragen beschäftigten, war es unsere erste Arbeit, Messvorrichtungen zur Bestimmung der vier Matrixadmittanzen im Frequenzbereich 1,5...600 MHz zu schaffen. Solche Vorrichtungen gab es damals im genannten Umfang anderweitig noch nicht. Als Beispiele mögen vier Bilder dienen (Fig. 2...5).

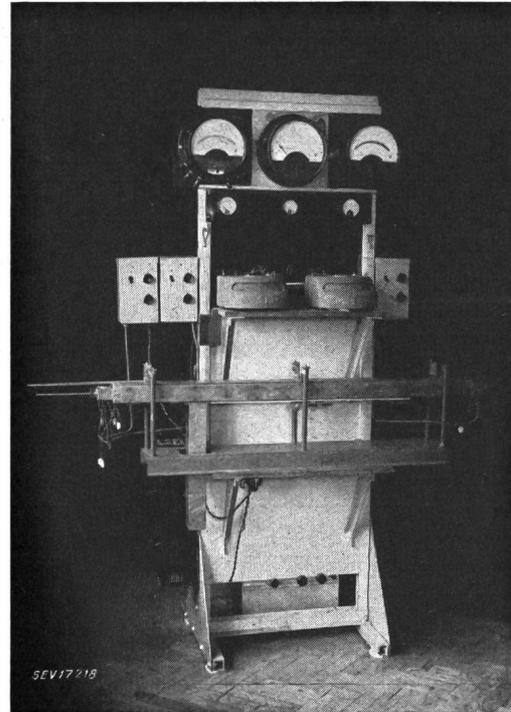


Fig. 3

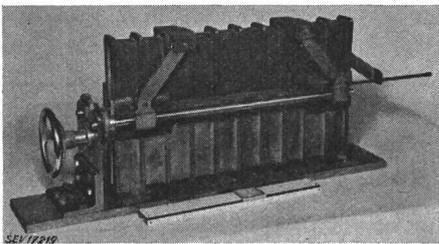
Vorrichtung zur Messung von Impedanzen bis etwa 600 MHz

Nach etwa zwei Jahren waren die Vorrichtungen fertig und gestatteten die Ausführung zuverlässiger Messungen. Diese Messergebnisse erlaubten zunächst, die Ursachen der Verringerung des Gewinnes bei wachsender Frequenz klar zu erkennen. Die Verlustzunahme der Elektronensteuerung erwies sich als nur eine der Ursachen, und in vielen Fällen nicht einmal als die wichtigste. Die Wirkungen der Elektrodenzuleitungen waren in den meisten praktischen Fällen relativ viel wichtiger. Auf Grund dieser damals neuen Ergebnisse gelang es, neue Röhrentypen zu konstruieren, welche bedeutend verbesserte Eigenschaften im Bereich hoher Frequenzen aufwiesen. Einer dieser Röhrentypen, welcher kurz vor dem Anfang des Krieges fertiggestellt war, hat in alliierten Flugzeugen in mehreren Millionen Stück Verwendung gefunden.

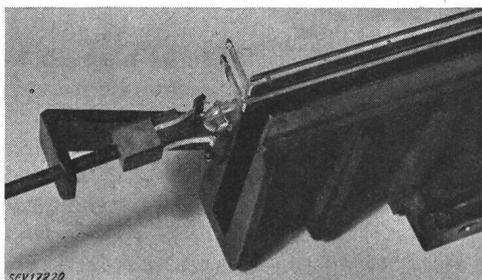
Im Kriege ist der genannte Frequenzbereich bedeutend erweitert worden, und jetzt müssen die betreffenden Messvorrichtungen bis etwa 30 000 MHz brauchbar sein. Auch heute existieren solche Geräte noch nicht in voll befriedigendem Umfang. Wir wollen nun im Elektrotechnischen Institut Messvorrichtungen der genannten Art schaffen, welche sowohl für Hochvakuum-Elektronenröhren, als auch für Gasentladungsröhren brauchbar sind.

Die Leistungsverstärkung ist immer mit einigen Störungserscheinungen verbunden, von denen das

sogenannte Rauschen, das von spontanen Schwankungen der Elektronenbewegung herrührt, eine der bekanntesten ist. Auch für diese Störungserscheinungen sind wir im Begriff, geeignete Messvorrichtungen zu schaffen.



a



b

Fig. 4
Wellenleitervorrichtung zur Impedanzmessung bis etwa 1500 MHz

a Vorrichtung
b Detail mit der für Vorrichtungen dieser Art eigens entwickelten Messdiode

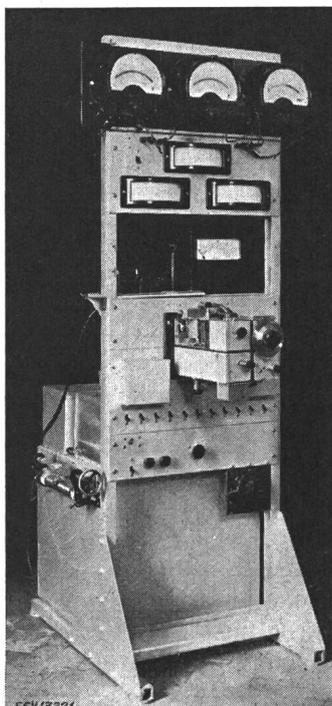


Fig. 5
Vorrichtung zur Messung der Eigenschaften von Überlagungsverstärkerstufen mit Elektronenröhren bis etwa 200 MHz

Diese Messvorrichtungen können ausser den genannten Zwecken noch vielen anderen dienen, z. B. der Bestimmung dielektrischer und magnetischer Eigenschaften verschiedener Werkstoffe in einem grossen Frequenzbereich als Funktion der Tempera-

tur. Solche Arbeiten haben meine früheren Mitarbeiter und ich vor Jahren schon verschiedentlich durchgeführt, und ich hoffe, diese Arbeiten im Elektrotechnischen Institut in weiterem Umfang fortsetzen zu können.

3. Leistungsverstärkung ohne Elektronenröhren

Bereits vor der Erfindung der Elektronenröhren wurde elektrische Leistungsverstärkung vielfach angewandt. Ein Beispiel hierfür ist das Mikrophon in seinen verschiedenen Formen. Die Eingangsleistungsquelle ist hierbei akustisch, und das Gerät entnimmt gesteuerte Leistung aus der Hauptleistungsquelle (z. B. einer Batterie). Unter bestimmten Einschränkungen können auch Relais als Leistungsverstärker bezeichnet werden. Durch die Entwicklung der Elektronenröhren ist die Weiterbildung nichtelektronischer Verstärker um viele Jahre verzögert worden. In den letzten 15 Jahren hat diese Weiterbildung wieder eingesetzt und heute verfügen wir bereits über einige beachtenswerte Gruppen solcher Geräte ohne Elektronenröhren.

Als einfachstes Beispiel betrachten wir die Anwendung eines *negativen Widerstandes* zu Verstärkungszwecken. Dieser negative Widerstand kann als einfacher Vierpol geschaltet werden. Die verfügbare Leistung am Eingang ist $P_1 = \frac{|U|^2}{4 R_1}$ und jene am

Ausgang $P_2 = \frac{|U|^2}{4 (R_1 - R)}$, vorausgesetzt dass

$|R| < R_1$. Offenbar tritt ein Gewinn $g_v = R_1 / (R_1 - R)$ auf, und dieser Gewinn kann, falls der Be-

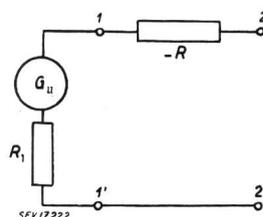


Fig. 6
Vierpol-Leistungsverstärker, der aus einem negativen Reihenwiderstand aufgebaut ist
1; 1' Eingangsklemmen; 2; 2' Ausgangsklemmen; G_u Leistungsquelle mit der Klemmenspannung U

trag von R sich jenem von R_1 nähert, sehr gross werden. Negative Widerstände dieser Art treten bei sogenannten fallenden Kennlinien auf, für welche dU/dI in einem bestimmten Kennlinienbereich negativ ist. Beispiele bilden Gasentladungen (Lichtbogen) und Halbleiterwiderstände. Diese Vorrichtungen sind mit einer gewissen Trägheit infolge der relativ beträchtlichen Ionenmassen bei Gasentladungen oder infolge Temperaturträgheit behaftet. Hierdurch kann der obige Gewinn nur in einem beschränkten Frequenzbereich erzielt werden. Messungen der Impedanz solcher negativer Widerstandsorgane in grösseren Frequenzbereichen können über diese Eigenschaften detaillierten Aufschluss geben, und wir planen die Ausführung solcher Messungen bei Gasentladungen und bei Halbleiterwiderständen unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Für Frequenzen oberhalb ihrer reziproken Zeitkonstante verhalten sich negative Widerstandsorgane der genannten Art wie Induktivitäten. Obwohl bisher die genannten Möglichkeiten der Lei-

stungsverstärkung nur bei kleinen Leistungen angewandt wurden, erscheint es technisch möglich, beträchtliche Ausgangsleistungen zu erhalten, und wir werden den Bedingungen hierfür experimentell und rechnerisch nachgehen.

Bekannte Leistungsverstärker, welche mit elektronischen Halbleitern operieren, sind seit etwa zwei Jahren die *Transistors*. Diese bestehen im wesentlichen aus zwei in geringem Abstand (z. B. $30 \mu\text{m}$) voneinander auf eine Halbleiteroberfläche drückenden Metallspitzen. Die eine Spitze liegt in einem Steuerkreis (Eingang), die andere Spitze in einem batteriegespeisten Ausgangskreis. Die erzielten Gewinne sind z. B. 100. Wir haben im Elektrotechnischen Institut solche Transistors hergestellt und analoge Gewinnzahlen gemessen. Auch hier werden die neuen Messvorrichtungen gestatten, alle Vierpolgrößen in beträchtlichen Frequenzbereichen zu bestimmen.

Bereits vor dem Kriege wurden sogenannte *magnetische Verstärker* manchenorts verwendet. Es gibt heute für solche Verstärker verschiedene Ausführungsformen, auf die wir aber nicht im einzelnen eingehen wollen. Der Gedanke, der diesen magnetischen Verstärkern zugrunde liegt, ist sehr allgemeiner Art und erlaubt eine grosse Zahl verschiedener Anwendungen, von denen zur Zeit erst wenige praktische Form gefunden haben. Es handelt sich um die Verwendung nichtlinearer Schaltelemente in Verstärkern. Diese werden dazu benutzt, eine geeignete Mischung der Steuer-Eingangsleistung mit der Hauptquellenleistung zu erreichen. Durch diese Mischung entsteht eine Ausgangsleistung, welche von der Eingangsleistung gesteuert wird. Im einfachsten Fall ist sie angenähert zur Eingangsleistung proportional und hat die gleiche Frequenz. Dies ist bei den üblichen magnetischen Verstärkern der Fall; die Frequenz ist hier Null, d. h. es handelt sich um Gleichstromverstärker. Bei den sogenannten Mischstufen von Superheterodyne-Empfängern, welche auf dem gleichen Grundgedanken beruhen, besteht zwar die genannte Proportionalität, aber die Frequenz ist am Ausgang eine andere (meistens niedriger) als am Eingang. In magnetischen Verstärkern wird als nichtlineares Schaltelement der Sättigungsbereich eines bewickelten ferromagnetischen Kernes benutzt. In den genannten Mischstufen benutzt man nichtlineare Kennlinien von Elektronenröhren oder Gleichrichtern. Offenbar können noch mehrere andere nichtlineare Schaltelemente benutzt werden, z. B. Kapazitäten oder Widerstände. Solche Elemente sind an sich vorhanden, und ihre Anwendung und Untersuchung für Verstärkerzwecke bildet eine lohnende und praktisch wichtige Aufgabe. Auch die bisherigen magnetischen Verstärker erschöpfen in keiner Weise die vorhandenen Möglichkeiten. Es ist beabsichtigt, diese systematisch zu untersuchen, wobei auch die Erweiterung ihres Bereiches für beträchtliche Ausgangsleistungen (Starkstrom) betrachtet werden soll. Durch die Anwendung neuer verlustarmer magnetischer Werkstoffe (ich denke z. B. an Ferrite) können voraussichtlich

magnetische Verstärker mit verbesserten Eigenschaften konstruiert werden.

Als letztes Beispiel von Verstärkern ohne Elektronenröhren wollen wir die *Maschinenverstärker* nennen, welche kurz vor dem Kriege von F. W. Alexanderson unter dem Namen «Amplidyne» in den Vordergrund gerückt wurden. Hier handelt es sich um Verstärker mit z. B. einigen Megawatt Ausgangsleistung, also um Verstärker für die Starkstromtechnik. Die betreffenden Maschinenverstärker werden als wirtschaftlicher bezeichnet als Elektronenröhrenverstärker gleicher Leistung. Ein normaler Gleichstromgenerator kann z. B. als einstufiger Verstärker bezeichnet werden. Als Eingang dienen die Klemmen der Erregerwicklung, als Ausgang die Kollektorbürsten. Die Leistungsverstärkung ist das Verhältnis der Ausgangsleistung zur Erregerleistung und liegt z. B. in der Grössenordnung einiger Hundert. Bei Amplidynemaschinen ist noch ein kurzgeschlossenes Bürstenpaar quer zur Primärerregung vorhanden, das einen magnetischen Fluss unter 90° zu jenem des Erregerkreises erzeugt. Dieser zweite Fluss dient als Erregung für den Ausgangskreis, der an einem Bürstenpaar quer zum erstgenannten angeschlossen ist. Die Leistungsverstärkung findet somit in zwei Stufen statt: vom Erregerkreis zum Kurzschlusskreis und vom Kurzschlusskreis zum Ausgangskreis.

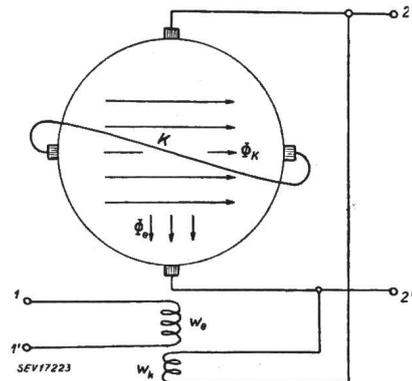


Fig. 7

Prinzipschaltbild eines Amplidyne-Maschinenverstärkers
1;1' Eingangsklemmen; 2;2' Ausgangsklemmen; K Kurzschlusskreis; ϕ_k Fluss erzeugt vom Kurzschlusskreis; ϕ_e Erregerfluss; w_e Erregerwicklung; w_k Kompensationswicklung

Die Gesamtleistungsverstärkung ist das Produkt der Verstärkungen in den beiden Stufen und kann z. B. 10^4 betragen. Die gezeichnete Kompensationswicklung soll die Rückwirkung des Ausgangskreises auf den Erregerkreis aufheben. Die Hauptleistungsquelle solcher Maschinenverstärker liegt im mechanischen Antrieb. Als Beispiele für Anwendungen dieser Maschinenverstärker nennen wir die automatische Werkzeugeinstellung bei Werkzeugmaschinen, die Regelung der Walzgeschwindigkeit bei Walzwerken und die Geschwindigkeitsregelung bei Papierfabrikationsmaschinen. In all diesen Fällen wird der Verstärkereingang von einem geeigneten Regelstrom gespeist, der z. B. von einer Photozelle herrühren kann (nach geeigneter Vorverstärkung). Die Ausgangsleistung hängt dann in einer vorausbestimmten Weise von dieser Regel-

leistung ab. Man kann auf solche Maschinenverstärker dieselben Grundbegriffe der Verstärkertechnik anwenden wie auf Röhrenverstärker, und wir planen entsprechende Arbeiten im Elektrotechnischen Institut. Die Verstärkerkenngrößen, insbesondere z. B. die Stossverstärkungseigenschaften, können mit Hilfe geeigneter Messvorrichtungen bestimmt werden.

Durch diese Beispiele hoffe ich gezeigt zu haben, dass der Grundgedanke der Leistungsverstärkung ein fruchtbares Leitmotiv für eine Reihe von interessanten Arbeiten im Elektrotechnischen Institut der ETH bildet.

Literatur

Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Wohl ist angestrebt, aus jedem der behandelten Gebiete einige neuere wichtige Arbeiten anzuführen, welche weitere Literaturangaben enthalten.

I. Vierpole mit Elektronenröhren

1. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Messungen der charakteristischen Eigenschaften von Hochfrequenz-Empfangsröhren zwischen 1,5 und 60 Megahertz. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 12(1935), S. 347...354.
2. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Einfache Schaltungsmassnahmen zur Verbesserung der Eigenschaften von Hochfrequenz-Verstärkerröhren im Kurzwellengebiet. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 13(1936), S. 260...268.
3. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Erweiterung der bisherigen Messungen der Admittanzen von Hochfrequenzverstärkerröhren bis 300 Megahertz. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 14(1937), S. 75...80.
4. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Die Ursachen für die Zunahme der Admittanzen moderner Hochfrequenz-Verstärkerröhren im Kurzwellengebiet. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 14(1937), S. 281...293.
5. *Strutt, M. J. O.*: Die charakteristischen Admittanzen von Mischröhren für Frequenzen bis 70 Megahertz. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 15(1938), S. 10...17.
6. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Messungen der komplexen Steilheit moderner Mehrgitterröhren im Kurzwellengebiet. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 15(1938), S. 103...111.
7. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Einige dynamische Messungen der Elektronenbewegung in Mehrgitterröhren. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 15(1938), S. 277...283.
8. *Strutt, M. J. O. u. K. S. Knol*: Messungen von Strömen, Spannungen und Impedanzen bis herab zu 20 cm Wellenlänge. *Z. Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik.* Bd. 53(1939), S. 187...195.
9. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Methoden zur Kompensierung der Wirkungen verschiedener Arten von Schrotteffekt in Elektronenröhren und angeschlossenen Stromkreisen. *Physica (Haag)* Bd. 8(1941), S. 1...22.
10. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Die Folgen einiger Elektronenträgheitseffekte in Elektronenröhren. I.: *Physica (Haag)* Bd. 8(1941), S. 81...108; II.: Bd. 9(1942), S. 65...83.
11. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Welche Größen kennzeichnen die Verwendbarkeit einer Elektronenröhre zur Verstärkung kleinster Signale? *Physica (Haag)* Bd. 8(1941), S. 424...425; Bd. 9(1942).
12. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Suppression of spontaneous fluctuations in amplifiers and receivers for electrical communication and for measuring devices. *Physica (Haag)* Bd. 9(1942), S. 513...527.
13. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Suppression of spontaneous fluctuations in 2 N-terminal amplifiers and networks. *Physica (Haag)* Bd. 9(1942), S. 528...538.
14. *Strutt, M. J. O. u. K. S. Knol*: Über ein Verfahren zur Messung komplexer Leitwerte im Dezimeterwellengebiet. *Physica (Haag)* Bd. 9(1942), S. 577...590.
15. *Strutt M. J. O. u. A. van der Ziel*: Verringerung der Wirkung spontaner Schwankungen in Verstärkern für Meter- und Dezimeterwellen. *Physica (Haag)* Bd. 9(1942), S. 1003...1012; Bd. 10(1943), S. 823...826.

16. *Strutt, M. J. O.*: Verstärker und Empfänger. Berlin, Springer, 1943.

17. *Strutt, M. J. O.*: Ultra- and extreme-short wave reception. New York, Van Nostrand, 1947.

18. *Strutt, M. J. O. u. A. van der Ziel*: Application of velocity-modulation tubes for reception at u. h. f. and s. h. f. *Proc. Inst. Radio Engr.* Bd. 36(1948), S. 19...23; Bd. 37(1949), S. 896...900, 1447.

II. Vierpole mit Halbleitern

1. *Bardeen, J. u. W. M. Brattain*: The transistor, a semiconductor triode. *Phys. Rev.* Bd. 74(1948), S. 230...231.
2. *Bardeen, J. u. W. M. Brattain*: Physical principles involved in transistor action. *Phys. Rev.* Bd. 75(1949), S. 1208...1225. (= *Bell. Syst. Techn. J.* Bd. 28(1949), S. 239...277.)
3. *Bardeen, J.*: On the theory of the A. C. impedance of contact rectifiers. *Bell. Syst. Techn. J.* Bd. 28(1949), S. 428...434.
4. *Becker, J. A. u. J. N. Shive*: The transistor, a new semiconductor amplifier. *Electr. Engng.* Bd. 68(1949), S. 215...221.
5. *Webster, A. E. Eberhard u. L. E. Barton*: Some novel circuits for the threeterminal semiconductor amplifier. *RCA Rev.* Bd. 10(1949), S. 5...16.
6. *Ryder, R. M. u. R. J. Kirchner*: Some circuit aspects for the transistor. *Bell. Syst. Techn. J.* Bd. 28(1949), S. 367...400.
7. *Kock, W. E. u. R. L. Wallace*: The coaxial transistor. *Electr. Engng.* Bd. 68(1949), S. 22...23.
8. *Shive, J. N.*: The double surface transistor. *Phys. Rev.* Bd. 15(1949), S. 689...690.
9. *Haegele, R. W.*: A cristal tetrode mixer. *Electronics* Bd. 22(1949), S. 80...81.
10. *Wells, W.*: Experimental germanium-crystal amplifier. *Audio Engng.* Bd. 32(1948), S. 6, 8, 9.
11. *Lehan, F.*: A transistor oscillator for telemetering. *Electronics* Bd. 22(1949), S. 90...91.

III. Magnetische Verstärker

1. *Krabbe, U.*: The transductor principle and application. *Asea J.* Bd. 20(1947), S. 119...131.
2. *Lamm, U.*: The transductor. D. C. presaturated reactor with special reference to transductor controll of rectifiers. *Acta Polytechn. Electr. Engng. Ser.* Bd. 1(1948), Nr. 5, ca. 200 S.
3. *Logan, F. G.*: Saturable reactors and magnetic amplifiers. *Electronics* Bd. 21(1948), Oktober, S. 104...109.
4. *Milnes, A. G.*: Magnetic amplifiers. *Proc. Instn. Electr. Engr.*, Part I, Bd. 96(1949), S. 89...98.
5. *Gale, H. M. u. P. D. Athinson*: A theoretical and experimental study of the series connected magnetic amplifier. *Proc. Instn. Electr. Engr.*, Part I, Bd. 96(1949), S. 99...114.
6. *ver Planck, D. W., M. Fishman u. D. C. Beaumariage*: An analysis of magnetic amplifiers with feedback. *Proc. Inst. Radio Engr.* Bd. 37(1949), S. 862...866.
7. *ver Planck, D. W. u. M. Fishman*: An analysis of interlinked electric and magnetic networks with application to magnetic amplifiers. *Proc. Inst. Radio Engr.* Bd. 37(1949), S. 1021...1027.
8. *Landon, V. D.*: The use of ferrite-cored coils as converters, amplifiers and oscillators. *RCA Rev.* Bd. 10(1949), S. 387...396.

IV. Amplidyne Maschinenverstärker

1. *Alexanderson, E. F. W., M. A. Edwards u. K. K. Bowman*: The amplidyne generator, a dynamoelectric amplifier for power control. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 43(1940), S. 104...106.
2. *Fisher, A.*: Design characteristics of amplidyne generators. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 43(1940), S. 107...113.
3. *Shoultz, D. R., M. A. Edwards u. F. E. Crever*: Industrial applications of amplidyne generators. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 43(1940), S. 114...119.
4. *Sequenz, H.*: Zur Theorie der Verstärkermaschine. *Elektrotechn. u. Maschinenbau* Bd. 62(1944), S. 173...179.
5. *Williams, D. R.*: The amplidyne. *Electr. Engng.* Bd. 65(1946), S. 208...213.
6. *Penin, F.*: Les applications industrielles de l'amplidyne. *Rev. gén. Electr.* Bd. 55(1946), S. 266...270.

7. Adkins, B.: Amplidyne regulating systems. J. Instr. Electr. Engr., Part IIa, Bd. 94(1947), S. 49...60.
 8. Schaelchlin, W.: Rotating stability regulators for synchronous motor drives. Trans. Amer. Inst. Electr. Engr., Bd. 66(1947) S. 884...887.
 9. Heumann, G. W.: Basic procedures in motor control. Part III: Amplidyne control circuits. Gen. Electr. Rev. Bd. 50 (1947), S. 41...48.
 10. Valentin, A.: Les dynamos amplificatrices. L'amplidyne. Bull. Soc. franç. Electr., Bd. 8(1948), S. 304...328.

11. Jung, R.: Perfectionnements au couplage Ward-Léonard pour machines d'extraction par l'emploi d'une excitation amplidyne. Bull. Soc. franç. Electr., Bd. 8(1948), S. 35...43.
 12. Delastre, J.: Les machines amplificatrices et régulatrices. Rev. Jeumont Bd. 24(1949), S. 5...15, 27...36.
 13. Hoffersberg, M. S.: The amplidyne generator, its performance and design. Trans. S. Afr. Inst. electr. Engr., Bd. 40(1949), S. 175...191.

Adresse des Autors:
 Prof. Dr. M. J. Strutt, Vorstand des Elektrotechnischen Institutes der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 6.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Berechnung der Wechselspannung einer Greinacher-Schaltung

Von H. Flückiger, Bern

621.319.52

Die Greinacher-Schaltung, auch Delon-Schaltung und Spannungsverdoppler-Schaltung genannt¹⁾, besteht prinzipiell aus zwei Einweg-Schaltungen mit einem Kondensator am Eingang. Fig. 1 zeigt diese Einweg-Schaltung, Fig. 2 die zwei Einweg-Schaltungen zur Greinacher-Schaltung zusammen-

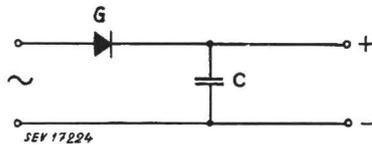


Fig. 1

Gleichrichter in Einweg-Schaltung mit Kondensator

gebaut. Die Spannungskurve eines Einweg-Gleichrichters mit einem Eingangskondensator ist in Fig. 3 wiedergegeben. Bei der Greinacher-Schaltung summieren sich entsprechend zwei solche Spannungskurven zur resultierenden Spannung. Die Addition ist in Fig. 4 dargestellt.

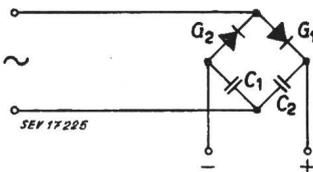


Fig. 2

Gleichrichter in Greinacher-Schaltung

Bei der Berechnung der für eine Greinacher-Schaltung zur Abgabe eines mittleren Gleichstromes I_{gm} bei einer mittleren Gleichspannung U_{gm} nötigen Wechselspannung U kann man von einem Einweg-Gleichrichter ausgehen, dessen Gleichspannung $U_{gm}/2$ und dessen Gleichstrom $I_{gm}/2$ beträgt. Des-

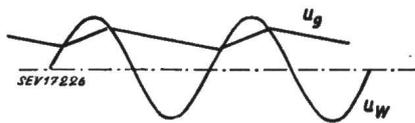


Fig. 3

Spannungskurve eines Gleichrichters mit Kondensator

u_w Speisende Wechselspannung
 u_g Gleichspannung am Kondensator

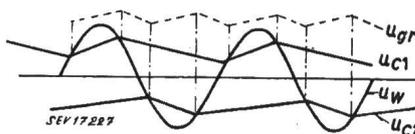


Fig. 4

Spannungskurve einer Greinacher-Schaltung

u_{c1} ; u_{c2} Spannungen an den Kondensatoren
 u_w Speisende Wechselspannung
 u_{gr} resultierende Gleichspannung

¹⁾ siehe auch H. Verse: Charakterisierung und einheitliche Berechnungsunterlagen der Gleichrichter mit Pufferkondensatoren. Bull. SEV Bd. 40(1949), Nr. 21, S. 818...826.

halb wird in der folgenden Berechnung zunächst die Theorie eines Einweg-Gleichrichters mit Kondensator entwickelt, wodurch die folgende Berechnung der Wechselspannung einer Greinacher-Schaltung verständlicher wird. In Fig. 5 sind die an den Gleichrichter angelegte Wechselspannung u_w und die am Kondensator liegende Gleichspannung u_g , die zwischen den Werten u_{g1} und u_{g2} schwankt, wiedergegeben. Dabei beträgt der Momentanwert der Wechselspannung u_w in bezug auf den Punkt 0:

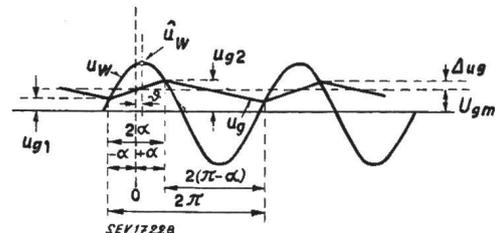


Fig. 5

Darstellung zur Berechnung der nötigen Wechselspannung

$$u_w = \hat{u}_w \cos(\omega t - \vartheta)$$

Die Grenzwerte der Gleichspannung betragen:

$$u_{g1} = \hat{u}_w \cos(\alpha + \vartheta)$$

$$u_{g2} = \hat{u}_w \cos(\alpha - \vartheta)$$

Der arithmetische Mittelwert der Gleichspannung wird damit:

$$U_{gm} = \frac{u_{g1} + u_{g2}}{2} = \frac{\hat{u}_w}{2} [\cos(\alpha + \vartheta) + \cos(\alpha - \vartheta)]$$

und nach einigen Umformungen:

$$U_{gm} = \hat{u}_w \cos \alpha \cos \vartheta$$

Der Mittelwert des den Gleichrichter durchfliessenden Gleichstromes beträgt:

$$I_{gm} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} i_g \omega dt$$

Da der Momentanwert des pulsierenden Gleichstromes i_g zur Zeit t der Spannungsdifferenz zwischen dem Momentanwert der angelegten Wechselspannung u_w und dem Momentanwert der Gleichspannung u_g proportional und dem Widerstand des Gleichrichterkreises R_i (Widerstand des speisenden Transformators R_T und des Gleichrichterelementes R_C) umgekehrt proportional ist, ergibt sich:

$$i_g = \frac{u_w - u_g}{R_i}$$

womit der Mittelwert des Gleichrichterstromes sich ergibt zu:

$$I_{gm} = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{\omega}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} (u_w - u_g) dt$$