

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 53 (1962)

**Heft:** 22

**Artikel:** Die Entwicklung auf dem Gebiete der Transistorumformer für Fluoreszenzlampen

**Autor:** Wilting, J.J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916990>

#### 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:** 17.02.2026

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

# Die Entwicklung auf dem Gebiete der Transistorumformer für Fluoreszenzlampen

Von J. J. Wilting, Eindhoven

621.327.534.15 : 621.314.57 : 621.382.3.004

Durch die Entwicklung von Transistorumformern ist das Interesse am Einbau von Leuchtstofflampen in Fahrzeuge wieder erwacht, da Transistorumformer nicht die Nachteile der bisher bekannten rotierenden mechanischen Umformer aufweisen.

Es wird daher ein Transistorumformer behandelt, der bei hohem Wirkungsgrad (ca. 80 %) eine fast sinusförmige Ausgangsspannung mit einer Frequenz von 8000 Hz erzeugt. Bei dieser Sinusspannung sind die Transistoren für Spannungsspitzen der Speisespannung weitgehend unempfindlich. Weitere vorteilhafte Eigenschaften dieses Umformertyps sind die geringe Empfindlichkeit gegenüber Fertigungstoleranzen und eine lange Lebensdauer.

Par suite des perfectionnements apportés aux convertisseurs à transistors, le montage de lampes à fluorescence dans les véhicules offre un nouvel intérêt, car ces convertisseurs ne présentent pas les inconvénients des convertisseurs mécaniques rotatifs.

L'auteur décrit un convertisseur à transistors qui produit une tension quasi sinusoïdale à une fréquence de 8000 Hz, avec un rendement élevé de l'ordre de 80 %. A cette tension d'alimentation sinusoïdale, les transistors sont très peu sensibles aux pointes de tension. Ce type de convertisseur se distingue également par sa faible sensibilité aux tolérances de fabrication et par sa longue durée de vie.

## 1. Einleitung

Die Entwicklung von Gleichstrom-Wechselstrom-Umformern mit Transistoren hat neue Möglichkeiten für die Beleuchtung von Fahrzeugen eröffnet. Gerade diesen sog. Transistorumformern ist das stark gestiegene Interesse an der Fluoreszenzbeleuchtung für Fahrzeuge zuzuschreiben. In einem früheren Artikel [1]<sup>1)</sup> wurden die technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte dieser Beleuchtungsart bei Verwendung von Transistorumformern bereits ausführlich behandelt. In diesem Aufsatz sei auf die technischen und theoretischen Eigenschaften von Transistorumformern eingegangen.

Viele Fabrikanten elektrotechnischer Artikel stellen jetzt Transistorumformer für die verschiedensten Zwecke her. Da gerade für die Beleuchtung ein hoher Wirkungsgrad, grosse Betriebssicherheit, geringes Gewicht, kleine Abmessungen und ein niedriger Herstellungspreis von ausschlaggebender Bedeutung sind, ist es vorteilhaft, ein besonders für diesen Zweck konstruiertes Modell zu verwenden.

Man wählt für einen entsprechenden Transistorumformer am besten eine hohe Schaltfrequenz, sowohl aus konstruktiven Überlegungen als auch wegen der grösseren Lichtausbeute [1], die damit bei Leuchtstofflampen erzielt werden kann. Im weiteren muss die vom Umformer gelieferte Spannung so hoch sein, dass auch bei stark schwankenden Betriebsbedingungen eine sichere Zündung der Lampen gewährleistet ist.

Bei Lampen mit warmen Elektroden ist es nicht einfach, auf der einen Seite zuverlässige Zündung bei der niedrigsten auftretenden Eingangsspannung und/oder bei niedrigen Umgebungstemperaturen zu erreichen, und auf der anderen Seite bei der höchsten auftretenden Eingangsspannung eine zu schnelle Zündung, die sog. Kaltzündung, welche die Lebensdauer der Lampe beeinträchtigt, zu verhüten. Wegen der negativen Widerstandscharakteristik der Gasentladungslampen [2] muss ein strombegrenzendes Element in Serie mit der Lampe liegen. Hiefür kommen wegen der hohen Verluste in Widerstandselementen nur Blindleistungselemente in Frage, so dass der Umformer mit einer Blindleistungskomponente belastet ist. Die zur Speisung dienende Gleichstromquelle kann diese selbstverständlich nicht auffangen, so dass der Umformer sie verarbeiten muss.

Auch werden durch Schaltvorgänge in den Netzen nicht selten Überspannungsspitzen erzeugt, gegen die die Transistoren in Umformerschaltung gesichert oder unempfindlich sein müssen.

Die Leistungstransistoren, die jetzt erhältlich und am besten verwendbar sind, gehören zu den mittelgrossen Typen, mit denen Umformer bis zu einer Leistung von etwa 50 W hergestellt werden können. Kleine Umformereinheiten besitzen nämlich folgende Vorteile:

1. Bei diesen Leistungen ist die Schaltgeschwindigkeit noch relativ hoch, wodurch die Anwendung höherer Schaltfrequenzen möglich ist. Dadurch kommt man zu kleineren Abmessungen der Umformer und relativ geringeren Herstellungspreisen [1]. Dabei lassen sich die vom Umformer hervorgerufenen Schallschwingungen leichter unterdrücken, als dies bei niedrigeren Schaltfrequenzen der Fall ist. Auch die Lichtausbeute ist bei höheren Frequenzen grösser.

2. Kleinere Einheiten führen auf die Dauer zu einer rationelleren Massenproduktion der Einzelteile wie der Endprodukte, also zu niedrigeren Preisen und grösserer Zuverlässigkeit.

3. Die Betriebssicherheit einer Anlage ist bei der Anwendung von mehreren kleineren Einheiten grösser als bei einem zentralen Umformer, da bei einem Defekt nur eine Beleuchtungseinheit ausfällt.

Dessenungeachtet bieten mehrere kleine Einheiten auch eine Möglichkeit, durch Serien- und/oder Parallelschaltung und durch Synchronisation Zentralumformer zu bilden, um damit zu einfacheren Schaltungen zu kommen.

Die Entwicklung der Transistoren für mittlere Leistungen geht in Richtung höherer Schaltgeschwindigkeiten, so dass sich in naher Zukunft noch höhere Schaltfrequenzen erreichen lassen werden. Z. Z. liegt die Grenze bei etwa 8000...10000 Hz. Für die hier in Frage kommenden Anlagen sollten die Frequenzen um den Faktor 2 höher zu liegen kommen. Die Leistung pro Umformereinheit müsste dabei etwa 100 W betragen können.

## 2. Umformerschaltungen

Es liegt zunächst auf der Hand, einen Umformer nach dem Prinzip des Rechteckwellen-Generators zu entwerfen. Dabei ist der Grundgedanke die bestmögliche Ausnutzung des Transistors, da er ja während der maximal möglichen Zeit — einer halben Periode — leitend ist und für den Energietransport sorgt.

Eine Rechteckspannung kann durch verschiedene Transistor-Schaltungen im Gegentakt erzeugt werden [1; 3; 4].

Weniger bekannt sind geeignete Belastungsschaltungen, die den Umformer mit einer Rechteckspannung optimal beladen. Durch physische Trägheit der Transistoren entstehen während der Umwandlung

<sup>1)</sup> Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

leicht hohe Verluste, die so grosse Momentanwerte erreichen können, dass der Transistor schnell zerstört wird. Beim Ausschalten des Transistors am Ende einer halben Periode muss also der Belastungsstrom wegen des infolge des Anhäufungseffekts nachfliessenden Kollektorstromes so niedrig wie möglich sein. Zu Beginn einer Halbperiode, wenn der Transistor leitend wird, gilt das gleiche, da die Einschaltträgeit den Strom nur allmählich ansteigen lässt.

Es sollen nun einige Schaltungen auf ihre Eignung für eine Umformer-Rechteckspannung untersucht werden. Bei den Berechnungen wird eine ideale Rechteckspannung von so hoher Frequenz vorausgesetzt, dass die TL-Lampe (Fluoreszenzlampe) angenähert durch einen linearen Widerstand ersetzt werden darf. Dabei wird angenommen, dass sich der Widerstandswert bei langsameren Stromschwankungen nur nach längerer Zeit ändert. Für langsame Änderungen gilt die bei Gasentladungen bekannte negative Widerstandskennlinie, so dass ein lineares, strombegrenzendes Element in Serie mit der TL-Lampe unentbehrlich ist. Weiter sei angenommen, dass die Rechteckspannung hoch genug ist, um die Forderung nach zuverlässiger Zündung der Lampe auch unter ungünstigen Bedingungen zu erfüllen.

### 2.1 TL-Lampe mit in Serie geschalteter Induktivität

Die Ersatzschaltung einer TL-Lampe mit' in Serie geschalteter Induktivität besteht aus dem Widerstand  $R$  in Serie mit der Induktivität  $L$ , an die eine Rechteckspannung  $U$  mit der Periodendauer  $T$  angeschlossen wird.

Der Strom kann folgendermassen abgeleitet werden: Bei  $0 \leq t \leq \frac{1}{2}T$  ist

$$i = \frac{U}{R} \left\{ 1 - \frac{2 e^{\frac{RT}{2L}}}{1 + e^{\frac{RT}{2L}}} e^{-\frac{R}{L}t} \right\} \quad (1)$$

Für die zweite Halbperiode gilt der gleiche Ausdruck, aber mit veränderten Vorzeichen (s. Fig. 1). Bei dieser Schaltung erreicht gerade während der Umwandlung der Spannung der Strom seinen Maximalwert. Die Ausschaltverluste betragen theoretisch etwa:

$$P_A = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} 2 V_b i_c dt$$

wenn  $V_b$  die Speisespannung an der Primärseite des Umformers und  $i_c$  der infolge des Anhäufungseffekts nachfliessende Kollektorstrom ist, der bei dieser Schaltung beträchtliche Werte annehmen kann. Der Wirkungsgrad ist daher auch nicht gross, und besonders

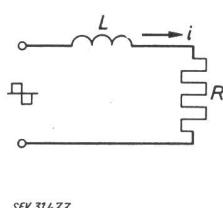
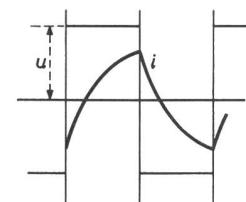


Fig. 1



Verlauf des Stromes bei induktiver Rechteckspannung  
L Strombegrenzungsinduktivität; i Belastungsstrom; R Ersatzwiderstand für eine TL-Lampe; u Scheitelwert der Rechteckspannung

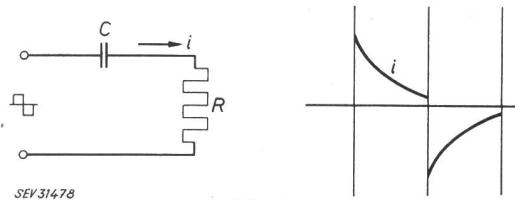


Fig. 2

Verlauf des Stromes bei kapazitiver Rechteckspannung  
C Strombegrenzungskondensator; R Ersatzwiderstand für eine TL-Lampe; i Belastungsstrom

bei Überspannungen der Speisespannung kann der Transistor leicht Schaden leiden.

### 2.2 TL-Lampe mit in Serie geschaltetem Kondensator

Wenn die Induktivität durch einen Kondensator ersetzt wird, so ist der Strom bei  $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$ ,

$$i = \frac{U}{R} \left( \frac{2 e^{\frac{RT}{2RC}}}{1 + e^{\frac{RT}{2RC}}} \right) e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

Die andere Halbperiode zeigt das gleiche Bild, nur mit geänderten Vorzeichen (Fig. 2). In solchen Schaltungen ist der Strom in dem Moment gross, in welchem der Transistor leitend wird. Die Einschaltträgeit erzeugt dadurch einen grossen Spannungsabfall, welcher die Rechteckform stört und grosse Einschaltverluste verursacht. Die Umwandlung erfolgt bei sehr geringem Strom, so dass Ausschaltverluste praktisch nicht auftreten. Der hohe Anfangstrom ist schon deshalb ein Nachteil, weil der Transistor dafür berechnet sein muss und dann nicht wirksam belastet wird.

### 2.3 Parallelschaltung des induktiven und des kapazitiven Zweiges

Die Parallelschaltung der beiden beschriebenen Belastungen ergibt unter der Voraussetzung, dass

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

für den Gesamtstrom:

$$i_{tot} = i_L + i_k = \frac{U}{R} \quad (4)$$

da ja in Gl. (3) vorausgesetzt wurde, dass:

$$\frac{R}{2L} = \frac{1}{2RC} = \alpha$$

Theoretisch ergibt sich dann eine rein ohmsche Gesamtbelaistung. Das bedeutet in der Hauptsache eine besonders wirksame Transistorbelastung. Es sollen nun beide Zweige gleich belastet werden, da beide Lampen gleich viel Licht abgeben sollen.

Die Leistung im induktiven Zweig beträgt:

$$W_L = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u i_2 dt = \frac{U^2}{R} \left( 1 - \frac{2}{\alpha T} \frac{e^{\alpha T} - 1}{e^{\alpha T} + 1} \right)$$

und im kapazitiven Zweig:

$$W_C = \frac{U^2}{R} \cdot \frac{2}{\alpha T} \frac{e^{\alpha T} - 1}{e^{\alpha T} + 1}$$

womit bewiesen ist, dass:

$$W_{tot} = W_L + W_C = \frac{U^2}{R}$$

Nun muss noch folgende Gleichung erfüllt werden:

$$W_L = W_C = \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{R} = \frac{2 U^2}{\alpha T R} \cdot \frac{e^{\alpha T} - 1}{e^{\alpha T} + 1}$$

woraus sich ergibt, dass:

$$\frac{e^{\alpha T} - 1}{e^{\alpha T} + 1} = \frac{\alpha T}{4}$$

oder

$$\alpha T \approx 3,8 \quad (5)$$

Für einen gegebenen Wert von  $R$  liegen  $L$  und  $C$  bei gewählter Frequenz fest. Ein erster Nachteil dieser Schaltung liegt darin, dass wegen des festliegenden Wertes von  $U^2/R$  die Spannung  $U$  bereits gegeben ist; man benötigt aber im Hinblick auf die Zündspannung noch eine gewisse Freiheit. Es ergibt sich denn auch, dass beide Bedingungen zu stark voneinander abweichenden Spannungen für die verschiedenen TL-Lampen führen, wodurch die Schaltung in der Praxis bereits unbrauchbar wird.

Der zweite Nachteil ist, dass der kapazitive Zweig allein am Kollektor des Transistors zu hohen Spitzenströmen führt, wenn der induktive Zweig aus irgendeinem Grunde ausfällt. Der Scheitelwert des Stromes im kapazitiven Zweig beträgt nach Gl. (2):

$$\hat{i}_k = \frac{U}{R} \cdot \frac{2 e^{\alpha T}}{e^{\alpha T} + 1}$$

Dieser Wert ist, wenn man Gl. (5) berücksichtigt, beinahe 2mal so hoch wie bei normaler Belastung. Eine Unterbelastung von 50% wäre an sich wegen der längeren Lebensdauer der Transistoren zu empfehlen, obwohl man es in der Praxis im allgemeinen nicht als schädlich für die Lebensdauer betrachtet, wenn an Stelle von zwei Lampen nur eine brennt. Schliesslich sei noch erwähnt, dass auch diese Schaltung wegen den Kommutierverlusten keine Überspannungsspitzen verträgt.

#### 2.4 Schaltung mit periodischer Belastung

Eine ideale Belastung ergibt offenbar eine Schaltung höherer Ordnung mit periodischem Charakter, die da-

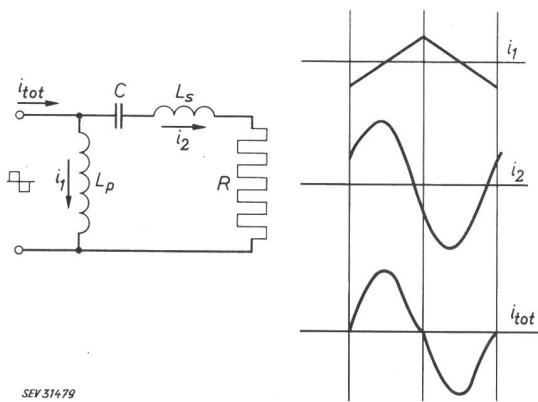


Fig. 3

Verlauf des Stromes bei der Belastung höherer Ordnung

$i_1$  Strom durch den induktiven Zweig;  $i_2$  Strom durch den Widerstandszweig;  $i_{tot}$  Gesamtstrom;  $R$  Ersatzwiderstand für eine TL-Lampe

für sorgt, dass der Strom während den Spannungssprüngen allmählich den Nullwert durchläuft. Es gibt dann keine Ein- und Ausschaltverluste, da die Umwandlung in dem Augenblick stattfindet, in dem der Strom gleich 0 ist. Als Beispiel diene die Schaltung in Fig. 3. Bei nicht brennender Lampe (= unterbrochener Widerstand) muss die Spannung hoch genug für die Zündung sein, während in brennendem Zustand die Leistung von  $R$  aufgenommen werden muss. Im folgenden sollen die Bedingungen hiefür festgelegt werden.

Für eine Halbperiode der Rechteckspannung von der Dauer  $T$  sind die Ströme (Fig. 3):

$$i_1 = \frac{U}{L_p} \left( t - \frac{T}{4} \right) \quad (6)$$

$$i_2 = \frac{2 U}{a \omega L_s} e^{-\alpha T} \sin(\omega t + \delta) \quad (7)$$

für

$$0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

worin

$$\alpha = \frac{R}{L_s}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L_s C} - \alpha^2}$$

$$a = \text{mod.} \left[ 1 + e^{-\alpha \frac{T}{2} - j\omega \frac{T}{2}} \right]$$

$$\delta = \arg \tilde{a}$$

Die Stromform geht aus Fig. 3 hervor.  
Bei  $t = 0$  setzt man  $i_1 + i_2 = 0$ , woraus folgt:

$$L_p = \frac{a \omega T L_s}{8 \sin \delta}$$

Die Parallelinduktivität erhält man durch einen Luftspalt im Umformertransformator. Für die weitere Berechnung der Schaltungselemente könnte man die Leistung in  $R$ , die bekannt ist, gleich setzen mit:

$$W_R = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u i_2 dt$$

Dies führt aber zu einer komplizierten, nicht gut lösaren Gleichung. Da man schon wegen der Forderung nach einem guten Transistorwirkungsgrad nur schwächere höhere Harmonische des Stromes zulassen darf, kommt man einfacher zum Ziel, wenn man abschätzt, in welchem Umfange die erste Harmonische allein zu der in  $R$  entwickelten Leistung beiträgt.

Für die Rechteckspannung schreibt man:

$$U(t) = \frac{4 U}{\pi} \left( \sin q t + \frac{1}{3} \sin 3 q t + \frac{1}{5} \sin 5 q t + \dots \right)$$

worin  $q = 2\pi/T$  die Schaltfrequenz ist.

Der Leistungsbeitrag in  $R$  der  $n$ -ten Harmonischen beträgt:

$$W_n = \frac{8 U^2 R}{\pi^2 n^2 Z_n^2} \quad (8)$$

wenn  $Z_n$  die in Serie geschaltete Impedanz von  $L_s$ ,  $C$  und  $R$  bedeutet. Für die  $n$ -te Harmonische gilt dann:

$$n^2 Z_n^2 = n^2 R^2 + \left( (n^2 qL_s - \frac{1}{qC}) \right)^2$$

Da der Winkel  $\delta$  in Gl. (7) positiv ist (voreilender Strom) wird  $1/qC > qL_s$  und  $1/qC = mqL_s$ . Damit wird:

$$n^2 Z_n^2 = n^2 R^2 + (n^2 - m^2) q^2 L_s^2$$

$m$  muss mit Rücksicht auf die höheren Harmonischen, aber auch damit die Spannung am Kondensator nicht zu hoch wird, zwei Bedingungen genügen:

$$m \ll 9$$

und

$$m > 1$$

Als Beispiel sei  $m = 2$ . In der ersten Näherung ist dann

$$n^2 Z_n^2 \approx (n^2 - m^2) q^2 L_s^2$$

Die dritte Harmonische ist bereits 49mal schwächer als die erste. Für diesen Fall darf man daher annehmen, dass:

$$W_{tot} \approx W_1 = \frac{8 U^2 R}{\pi^2 (R^2 + q^2 L_s^2)} \quad (8a)$$

Hieraus sind alle Elemente zu berechnen. Die Spitzenspannung am Kondensator wird:

$$\hat{U}_C \approx \frac{m}{m-1} \cdot \frac{4}{\pi} U$$

An den Klemmen der Lampe muss doch mindestens mit einer maximalen Spannung von  $U = 300$  V (bei einer 40-W-TL-Lampe) gerechnet werden. Bei  $m = 2$  wird der Scheitelwert der Kondensatorspannung etwa 760 V betragen, so dass man in diesem Fall einen ziemlich teuren Kondensator braucht. Wegen der schnell zunehmenden dritten Harmonischen kann  $m$  jedoch nicht viel grösser gewählt werden.

Wichtig für eine solche Schaltung ist eine von der Betriebsspannung usw. unabhängige Schaltfrequenz, die man dadurch erreichen kann, dass man in die Rückkopplungskreise ein frequenzbestimmendes Element aufnimmt, dessen Eigenfrequenz durch geometrische Faktoren bestimmt ist.

Man kann auch durch Verwendung von Magnetzern während der Nulldurchgänge des Stromes Spannungsimpulse erzeugen, die die Transistorkommunikation einleiten. Durch eine günstige Stromform kann der Transistor wirksamer belastet werden, d. h. relativ mehr Leistung schalten.

Bei dieser Art Belastung ist der Umformer auch erheblich widerstandsfähiger gegen Spannungsspitzen. Aber auch in diesem Punkt lässt sich eine wesentliche Verbesserung erzielen, indem eine positive Basisspannung angelegt wird, ehe die Spannung über den Kollektor-Emitterdurchgang anwächst. Die Durchschlagspannung wird hierdurch beträchtlich erhöht [5].

Es sei nun im folgenden eine Schaltung besprochen, bei der dies auf einfache Weise automatisch erreicht wird.

## 2.5 Generator mit unterbrochener Ansteuerung

In einem Generator, dessen Transistoren kürzer als eine halbe Periode ausgesteuert sind, erfolgt die Umwandlung nicht kontinuierlich. Sie wird jedesmal sozusagen angehalten oder unterbrochen. Eine solche Schaltung hat einen hohen Wirkungsgrad und ist

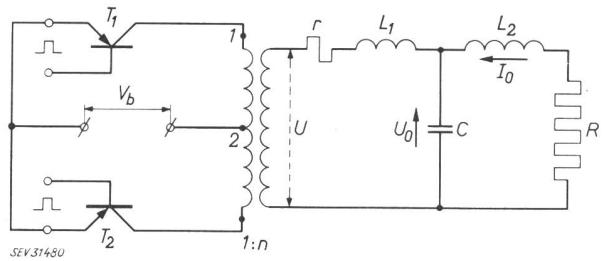


Fig. 4  
Transistorumformer mit impulsförmiger Basissteuerung  
für unterbrochene Ansteuerung

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> in Gegentakt geschaltete Leistungstransistoren; V<sub>b</sub> Speisespannung; U Sekundärspannung; U<sub>0</sub> Kondensator-Restspannung

ziemlich unempfindlich gegenüber hohen Spannungs-impulsen. Da sich mit ihr sinusförmige Ausgangsspannung erzeugen lässt, hat man grössere Freiheit in der Wahl des Belastungskreises. Diese Schaltung soll zunächst an Hand eines von aussen gesteuerten Generators besprochen werden.

In der Schaltung der Fig. 4 werden den Basen der Transistoren T<sub>1</sub> und T<sub>2</sub> Stromimpulse der Wiederholungsfrequenz  $\nu$  und der Dauer  $\tau$  ( $\tau < 1/2 T$ , siehe Fig. 5), zugeführt. Wie die Transistoren sich dann verhalten, wurde in [6] veröffentlicht. Dort wird als Anstiegzeit des Kollektorstromes angegeben:

$$t_r \approx \tau_c \ln \frac{\alpha' I_{b1}}{\alpha' I_{b1} - I_c} \quad (9)$$

als Ladezeit:

$$t_s \approx \tau_s \ln \frac{\alpha' I_{b1} + \alpha' I_{b2}}{I_c + \alpha' I_{b2}} \quad (10)$$

und als Abfallzeit:

$$t_f \approx \tau_c \ln \left( 1 + \frac{I_c}{\alpha' I_{b2}} \right) \quad (11)$$

worin  $I_{b1}$  der Basisstrom in Durchlassrichtung,  $I_{b2}$  der Basisstrom in Sperrrichtung,  $I_c$  der Kollektorstrom,  $\alpha'$  der Stromverstärkungsfaktor,  $\tau_c$  und  $\tau_s$  Konstanten der verwendeten Transistoren bedeuten.

Für praktische Zwecke ist  $\tau_s \approx \tau_c$ , so dass sich ergibt:

$$t_s + t_f \approx \tau_c \ln \left( 1 + \frac{I_{b1}}{I_{b2}} \right) \quad (12)$$

Dies ist gleich der Ausdruck für  $t_f$ , wenn  $I_c = I_{cm} = \alpha' I_{b1}$  ist.

Ein Basisimpuls verursacht einen bestimmten «Kollektordurchlass» (Fig. 6). Die Grenzlinien bezeichnen den maximalen Kollektorstrom, den der Transistor durchlässt. Der von der Belastung abhängige Kollektorstrom muss dann bis zu dem Augenblick, in dem der Transistor abschalten muss, im nicht schraffierten Bereich bleiben. Im Augenblick  $t_0$ , in dem z. B. T<sub>1</sub> leitend wird, erhalten die Klemmen 1—2 in Fig. 4 die

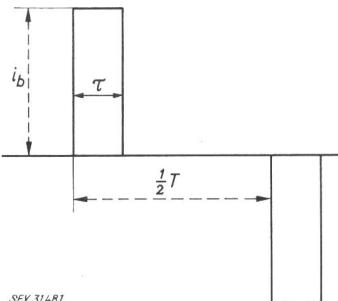


Fig. 5  
Basissteuerimpuls von Fig. 4  
i<sub>b</sub> Scheitelwert des Strom-  
pulses; τ Pulsdauer;  
1/2 T Dauer einer Halb-  
periode

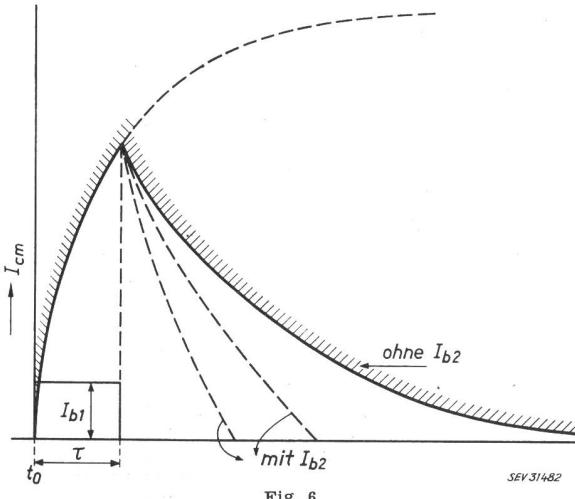


Fig. 6

Kollektordurchlass bei impulsförmiger Basisspannung

$I_{cm}$  maximal durchfließbarer Kollektorstrom;  $I_{b1}$  Basisstrom in Durchlassrichtung;  $I_{b2}$  Basisstrom in Sperrrichtung;  $\tau$  Dauer eines Basisstromimpulses

Speisespannung  $V_b$  (wenn man den geringen Spannungsverlust über  $T_1$  vernachlässigt), während dann an der Sekundärseite die Spannung  $U = nV_b$  entsteht.

Nimmt man an, dass sich das System in einem quasi stationären Zustand befindet, dann ist in der Zeit  $t = t_0$  am Kondensator C eine Restspannung  $U_0$  vorhanden, und durch  $L_2$  fließt ein Strom  $I_0$  in der in Fig. 4 angegebenen Richtung. Für den Sekundärkreis erhält man mit Hilfe der Operatoren-Rechnung [7] im p-Bereich folgenden Ausdruck für den Gesamtstrom:

$$I_p = \frac{U \left( PL_2 + R + \frac{1}{pc} \right) - U_0 (PL_2 + R) - I_0 \frac{L_2}{C}}{p \left( p^2 L_1 L_2 + p L_1 R + p L_2 R + \frac{L_1 + L_2}{C} + \frac{R+r}{pC} + rR \right)} \quad (13)$$

Eine brauchbare allgemeine Lösung lässt sich für eine solche Gleichung dritten Grades nicht finden. Man muss sich deshalb mit einer angenäherten Lösung begnügen. Wenn  $L_1 \ll L_2$  und  $r \ll R$  ist, was bisher in der Praxis zu den besten Ergebnissen geführt hat, dann kann in erster Näherung  $L_1$  im Verhältnis zu  $L_2$  und  $r$  im Verhältnis zu  $R$  vernachlässigt werden. Gl. (13) kann nun so geändert werden, dass sich der Nenner in Faktoren auflösen lässt:

$$I_p \approx \frac{U \left( pL_2 + R + \frac{1}{pC} \right) - U_0 (pL_2 + R) - I_0 \frac{L_2}{C}}{p \left( pL_1 + r + \frac{1}{pC} \right) (pL_2 + R)}$$

Wenn man nun noch im ersten Glied des Zählers  $L_1$  zu  $L_2$  und  $r$  zu  $R$  addiert, so erhält man eine weitere Vereinfachung:

$$I_p \approx \frac{U - U_0}{L_1 \left( p^2 + p \frac{r}{L_1} + \frac{1}{L_1 C} \right)} + \frac{I_0 \frac{1}{L_1 C}}{\frac{U}{L_2 p \left( p + \frac{R}{L_2} \right)} - \left( p^2 + p \frac{r}{L_1} + \frac{1}{L_1 C} \right) \left( p + \frac{R}{L_2} \right)} \quad (14)$$

Nach dem t-Bereich aufgelöst:

$$I(t) = \frac{U - U_0}{\omega L_1} e^{-\alpha t} \sin \omega t + \frac{U}{R} (1 - e^{-\beta t}) - \frac{I_0}{R^2} \frac{1}{L_1 C} e^{-\beta t} + \frac{I_0}{\sin \varphi} e^{-\alpha t} \sin (\omega t + \varphi) \quad (15)$$

worin

$$\alpha = \frac{r}{2 L_1} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \alpha^2} \quad \beta = \frac{R}{L_2}$$

und

$$\sin \varphi = - \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \left( \frac{r}{L_1} - \frac{R}{L_2} \right)^2}}$$

Nun ist

$$\frac{1}{L_1 C} \gg \left( \frac{r}{L_1} \right)^2$$

weil  $r$  der Parasitärwiderstand des Stromkreises ist.  $R/L_2$  muss klein genug sein, damit sich (wenn  $L_1 \ll L_2$ ) ergibt:

$$\frac{1}{L_1 C} \gg \left( \frac{R}{L_2} \right)^2$$

In zweiter Näherung kann man dann schliesslich schreiben:

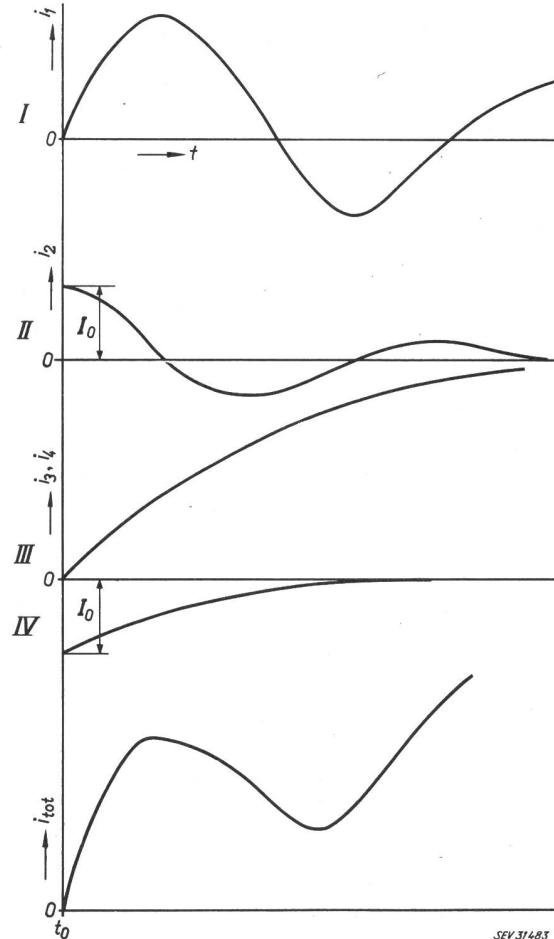


Fig. 7  
Die verschiedenen Einzelströme der Formel (16),  
 $I(t) = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$   
I 1. Glied; II 2. Glied; III 3. Glied; IV 4. Glied

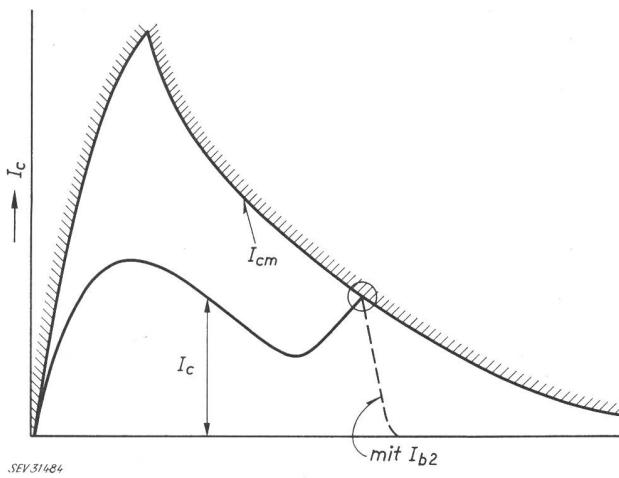


Fig. 8

**Schnittpunkt der  $I_c$ -Kurve mit der  $I_{cm}$ -Kurve**  
Nach Überschreiten dieses Punktes muss der Kollektorstrom  $I_c$  abnehmen

$$I(t) \approx \frac{U - U_0}{\omega L_1} e^{-\alpha t} \sin \omega t + I_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{U}{R} (1 - e^{-\beta t}) - I_0 e^{-\beta t} \quad (16)$$

Die Stromform ist aus Fig. 7 ersichtlich.

Der Zeitpunkt  $t_1$ , in dem der Transistor jeweils abschaltet, hängt nun von dem Moment ab, in dem der Kollektorstrom den Sättigungswert erreicht. Der Kollektorstrom verläuft ebenfalls nach Fig. 7, wenn der Transformator eine sehr hohe Reaktanz hat, so dass der Leerlaufstrom des Transformators vernachlässigt werden kann. Der Augenblick, in dem die Stromkurve die Grenzlinie des Kollektordurchlasses schneidet, muss der Kollektorstrom mindestens entsprechend dieser Grenzlinie abnehmen (Fig. 8).

Wenn man im Augenblick  $t_1$  eine positive Basisspannung anlegt und dadurch einen kurz anhaltenden Basisstrom  $I_{b2}$  in Sperrrichtung erzeugt [siehe Gl. (10) und (11)], kann man den Kollektorstrom wesentlich schneller zum Abklingen bringen. Der Spannungsverlauf am Transformator ist in Fig. 9 skizziert. Während der Zeitspanne  $t_0 - t_1$  entspricht die Spannung an den

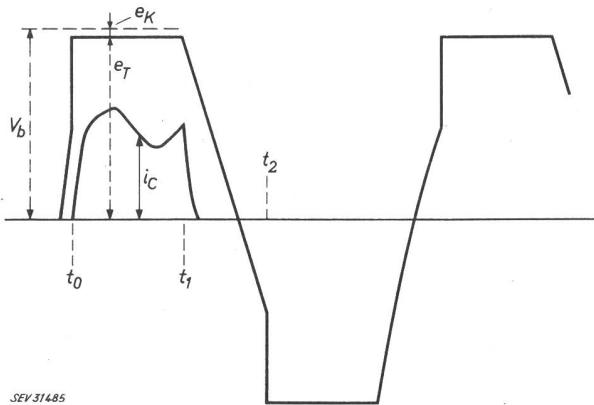


Fig. 9

**Verlauf der Transformatorspannung und des daraus folgenden Kollektorstromes**

$V_b$  Speisespannung;  $e_r$  Transformatorspannung;  $e_k$  Spannungsabfall am Transistor;  $i_c$  Kollektorstrom;  $t_0$  Einschaltmoment des Transistors  $T_1$ ;  $t_1$  Ausschaltmoment des Transistors  $T_1$ ;  $t_2$  Einschaltmoment des Transistors  $T_2$

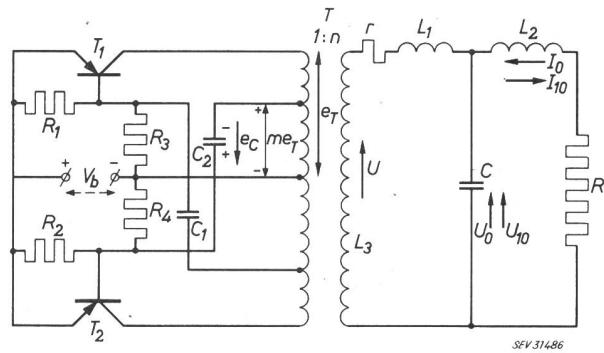


Fig. 10

**Prinzipschaltbild eines selbstschwingenden Transistorumformers mit unterbrochener Ansteuerung**  
 $T_1, T_2$  in Gegentakt geschaltete Transistoren;  $e_r$  primärseitige Spannung des Transformators  $T$ ;  $R_1 \dots R_4, C_1, C_2$  Rückkopplungselemente;  $e_g$  Ladespannung des Rückkopplungskondensators;  $me_r$  primärseitige Teilspannung des Transformators;  $U$  Sekundärspannung;  $I_o, U_o, I_{10}, U_{10}$  Strom- und Spannungswerte, bezogen auf  $t_0$  und  $t_1$

Klemmen 1—2 (s. Fig. 4) ungefähr der Speisespannung  $V_b$ : nach dem Zeitpunkt  $t_1$  wird der Sekundärkreis durch Abschaltung von  $T_1$  von der Spannungsquelle getrennt. Der Transformator erhält dann Spannung vom Kondensator, der sich mit einer Eigenfrequenz von

$$\sqrt{\frac{1}{L_2 C} - \frac{R^2}{4 L_2^2}}$$

entlädt. Im Zeitpunkt  $t_2$  wird aber Transistor  $T_2$  leitend und die Spannung steigt mit entgegengesetzten Vorzeichen wieder auf etwa  $V_b$  an. Durch den gleitenden Spannungsverlauf während des Abschaltens sind die Verluste gering.

### 2.6 Selbstschwingende Schaltung

Durch Einschaltung einer Rückkopplung nach Fig. 10 kann das System auf einfache Weise selbstschwingend gemacht werden. Die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  dienen als Startwiderstände; sie sorgen dafür, dass genug negative Basisspannung vorhanden ist und beide Transistoren gerade eben Strom durchlassen. Durch stets vorhandene Unterschiede zwischen den beiden Stromkreishälften entsteht eine Initialspannung am Transformator, wodurch einer der Transistoren, z. B.  $T_1$ , ziemlich plötzlich über die Rückkopplung weiter ausgesteuert wird. Der andere Transistor,  $T_2$ , dagegen erhält über den Rückkopplungskondensator  $C_2$  eine Spannung entgegengesetzter Polarität und wird dadurch gesperrt. Der Basissstrom des auszusteuernden Transistors verläuft impulsförmig; er steigt anfänglich steil an, wird aber durch einen gewissen Widerstand und die Streuungs-Selbstinduktivität im Basiskreis begrenzt und fällt dann nach einer exponentiellen Linie ab. Die Impulsdauer wählt man in der Größenordnung von 20  $\mu$ s. Nachher ist z. B. der Kondensator  $C_1$  aufgeladen. Sinkt nun im Zeitpunkt  $t_1$  die Transformatorspannung (siehe auch Fig. 9), weil der Sättigungsstrom des Kollektors erreicht ist, dann entsteht plötzlich in der Basis von  $T_1$  durch die Ladung von  $C_1$  eine positive Spannung. Diese verursacht dann die schnelle Abschaltung.

Allmählich wird dann  $C_1$  über  $R_1$  usw. entladen. Um den Zeitpunkt zu bestimmen, in dem  $T_2$  leitend wird, muss man vom quasi-stationären Zustand aus-

gehen. Der Kondensator  $C_2$  entlädt sich und die Basisspannung von  $T_2$  (Fig. 10)

$$m e_t + e_C$$

geht infolge Abnahme und Umkehrung von  $e_t$  und infolge Abnahme von  $e_C$  ziemlich schnell von positiv nach negativ über. An dem in Fig. 11 angegebenen Schnittpunkt wird daher  $T_2$  leitend und erreicht durch die kumulative Wechselwirkung von Basisstrom und Transformatorspannung schnell den ausgesteuerten Zustand. Den Zeitpunkt  $t_2$  kann man mit Hilfe der Schwingzeit und der Dämpfung des Sekundärkreises und durch die Zeitkonstanten  $R_1 C_1$  und  $R_2 C_2$  ändern.

Bei zu stark gedämpftem Ausschlag kann es vorkommen, dass für eine gegebene  $RC$ -Zeit kein Schnittpunkt vorhanden ist; der Generator schwingt dann zwar jedesmal ein, nicht aber durch. Damit die Leistungsaufnahme in den Widerständen  $R_1, R_2, R_3$  und  $R_4$  nicht zu gross wird, müssen diese gross gewählt werden und die Dämpfung des Sekundärkreises gering sein. Eine gute Vorstellung über die Grössenordnung der Elektrodenspannungen erhält man auf einfache Weise, wenn man Diagramme der Spannungen in übertriebener Darstellung zeichnet. Fig. 12 zeigt ein solches Diagramm mit den verschiedenen Spannungen des Umformers der Fig. 10. Zu bemerken ist, dass fast unmittelbar nach dem Beginn des Abschaltvorganges eine positive Basisspannung vorhanden ist. Hierdurch nimmt die Abschaltgeschwindigkeit stark zu, da ein kurzzeitiger Strom  $I_{b2}$  in Sperrrichtung [siehe auch Gl. (13)] wieder sperrt. Der Anfangswert der positiven Basisspannung hängt wegen der Entladung von  $C_1$  bzw.  $C_2$  von  $R_1$  bzw.  $R_2$  ab. Durch das Vorhandensein einer positiven Basisspannung beim Anwachsen der Kollektorspannung ist dieser Umformer weniger empfindlich gegen Überspannungen als die vorher beschriebenen Ausführungen.

#### 2.6.1 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad des Umformers nimmt um so mehr zu, je grösser die Widerstände  $R_1 \dots R_4$  gewählt

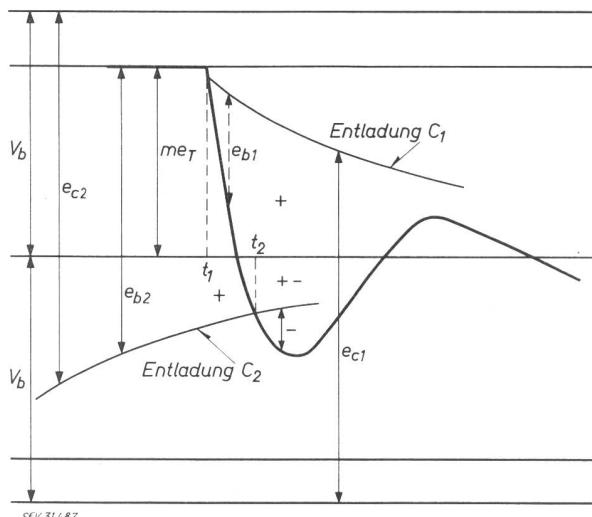


Fig. 11

Verlauf der Spannungen an den Transistorelektroden und den Schaltelementen während der Durchlass- und Sperrzeit des Transistors  $T_1$

$V_b$  Speisespannung;  $e_{c2}$  Spannung am Rückkopplungskondensator  $C_2$ ;  $e_{b1}$  positive Basisspannung an  $T_1$ ;  $e_{b2}$  positive Basisspannung an  $T_2$ ;  $m e_T$  TeilsSpannung am Transformator;  $t_1$  Ausschaltmoment des Transistors  $T_1$ ;  $t_2$  Einschaltmoment des Transistors  $T_2$

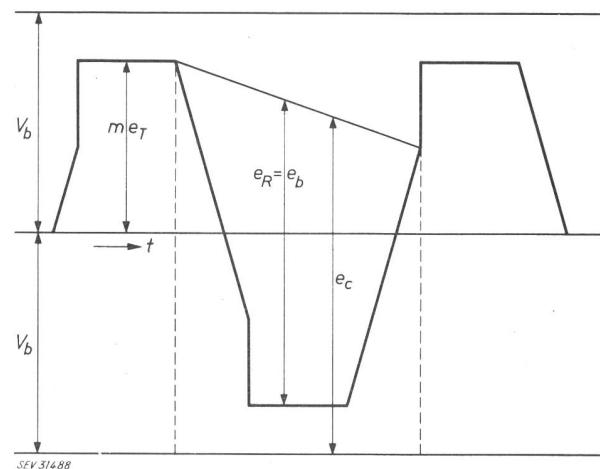


Fig. 12  
Die verschiedenen Spannungen in übertriebener Darstellung  
(«Karikatur-Diagramm»)  
Bezeichnungen siehe Fig. 11

werden, soweit dadurch die Leistungsaufnahme in den Widerständen noch nennenswert vermindert und die Abschaltgeschwindigkeit der Transistoren erhöht wird. Demnach muss der gesamte Belastungskreis zur Schaffung dieser Voraussetzungen eine geringe Dämpfung besitzen. Grundsätzlich muss die Transformatorspannung stark schwanken. Die folgende Berechnung soll zeigen, welchen Einfluss der Dämpfungscoefficient auf diese Schwankungen hat.

Im Zeitpunkt  $t_1$  schwingt der Sekundärkreis frei aus, und die Kondensatorspannung (= Transformatorspannung, falls dessen Selbstinduktion relativ hoch ist) wird in der Laplace-Transformation:

$$U_c(p) = \frac{U_{10}}{p} - i_c \frac{1}{pC} = \frac{U_{10}}{p} - \frac{U_{10} + pL_2 I_{10}}{p \cdot pC \left( pL_2 + R + \frac{1}{pC} \right)}$$

$U_{10}$  ist die Spannung am Kondensator im Zeitpunkt  $t = t_1$ ,  $I_{10}$  ist der Strom von  $L_2$  in diesem Zeitpunkt.

Zurücktransformiert in den  $t$ -Bereich ergibt dies:

$$U_c(t) = 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{U_{10} + \left( -\frac{\beta}{2} - j q \right) L_2 I_{10}}{\left( -\frac{\beta}{2} - j q \right) (-2 j q) L_2 C} e^{-\frac{\beta}{2} t - j q t} \right]$$

Woraus schliesslich folgt:

$$U_c(t) = \frac{U_{10}}{\sin \varphi} e^{-\frac{\beta}{2} t} \sin(q t + \varphi) \quad (17)$$

Darin ist, wenn  $\varphi$  im zweiten Quadrant liegt:

$$\sin \varphi = \frac{q}{\sqrt{\left(\frac{\beta^2}{4} + q^2\right) \left[ \left(1 - \frac{R}{2} \cdot \frac{I_{10}}{U_{10}}\right)^2 + q^2 L_2^2 \left(\frac{I_{10}}{U_{10}}\right)^2 \right]}} \quad (18)$$

$$\frac{\beta}{2} = \frac{R}{2 L_2} \quad q = \sqrt{\frac{1}{L_2 C} - \frac{\beta^2}{4}}$$

Zur Illustration diene Fig. 13. Der Winkel  $\varphi$  liegt im zweiten Quadrant, so dass  $\sin \varphi$  mit zunehmendem  $\varphi$  abnimmt und umgekehrt. Bei abnehmendem Wert von  $\sin \varphi$  wird die Schwingungsamplitude durch Zu-

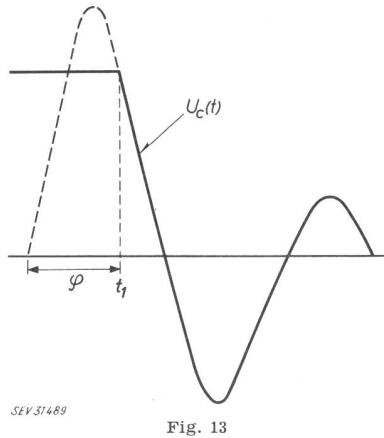


Fig. 13

Phasenwinkel  $\varphi$  der Gl. (17)

$U_c(t)$  Spannung am Transformator oder Kondensator C aus Fig. 10;  
 $t_1$  Ausschaltmoment des Transistors  $T_1$

nahme des Koeffizienten in Gl. (17) grösser. Ausserdem wird, wie Fig. 13 zeigt, die Zeit  $t_2 - t_1$  kürzer, und dadurch die Dämpfung kleiner, wenn  $\varphi$  zunimmt. Aus Gl. (16) ist ersichtlich, dass  $I_{10}$  abnimmt, wenn  $R$  bei nicht zu kleinem  $\beta$  grösser wird;  $U_{10}$  dagegen hängt wenig oder gar nicht von  $R$  ab. Im Prinzip dürfte dann  $\sin \varphi$  mit zunehmendem  $\beta$  wachsen, besonders in einem bestimmten Bereich des Verhältnisses  $q/\beta$ . Im Extremfall wird bei sehr langer Zeit  $t_1 - t_0$ ,  $I_{10} \approx U_{10}/R$ .

Die Spannung  $U_c(t)$  kann auch auf andere Weise ausgedrückt werden:

$$U_c(t) = \frac{U_{10}}{\sin \delta} e^{-\frac{\beta}{2} t} \sin(qt + \delta) - \frac{I_{10}}{qC} e^{-\frac{\beta}{2} t} \sin qt$$

worin

$$\delta = \sqrt{q^2 + \frac{1}{4} \beta^2}$$

Hieraus ist deutlich zu ersehen, dass der Nulldurchgang von  $U_c(t)$  auf einen späteren Zeitpunkt fällt, d.h. wenn  $I_{10}$  kleiner wird. Das bedeutet eine Verkleinerung von  $\varphi$  in Gl. (17).

Das Anwachsen der Dämpfungszeitkonstanten wirkt sich besonders stark auf nicht allzu grosses  $q/\beta$  aus. Bei dem Verhältnis  $q/\beta \geq 10$  ist der Einfluss von Schwankungen in  $R$  aber schon ziemlich gering. Weil Speisespannungsschwankungen bei TL-Lampen starke Schwankungen des Äquivalentwiderstandes hervorrufen, muss man dieses Verhältnis gross genug wählen, um Schwierigkeiten zu vermeiden. Weil man durch die Zündspannung gebunden ist, kann man das Verhältnis

$$\frac{q}{\beta} = \frac{qL}{2R} = 2Q$$

Kreisgüte genannt, der Schaltung nicht genug vergrössern. Da die Kreisgüte im allgemeinen aber

$$Q = \frac{\text{Blindleistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$$

ist, kann man auch andere Wege gehen. Versieht man den Transformator mit einem Luftspalt, so erhält man eine parallel zum Sekundärkreis wirkende Selbstinduktivität. Hiedurch kann die Blindleistung des gesamten Belastungskreises erheblich gesteigert werden.

## 2.6.2 Basissteuerimpuls

Für das Anwachsen des Kollektorstromes  $I_c$  gilt folgende Beziehung:

$$I_c = I_{cm} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}\right) \quad (19)$$

worin  $\tau_c$  in [6] definiert ist und  $\tau_c$  eine physikalische Zeitkonstante bedeutet. Der gesamte Belastungsstrom  $I$  muss offenbar stets kleiner sein als  $I_c/n$  ( $n$  Übersetzungsverhältnis) bis zu dem Augenblick, in dem der Transistor abschaltet.

Das anfängliche Anwachsen des Stromes  $I$  folgt aus Gl. (16):

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{t=0} = \frac{U - U_0}{L_1} - \frac{r I_0}{2 L_1} + \frac{U}{L_2} + \frac{I_0 R}{L_2}$$

Da  $L_2 \gg L_1$ , genügt:

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{t=0} \approx \frac{U - U_0}{L_1} \quad (20)$$

Die Ströme in den Gl. (16) und (19) verlaufen anfangs beide grundsätzlich exponentiell, so dass es ausreicht, wenn man als Bedingung setzt:

$$\frac{I_{CM}}{n \tau_c} > \frac{U - U_0}{L_1} \quad (21)$$

weil  $I_{CM} = \alpha' I_b$ :

$$\frac{\alpha'}{\tau_c} > \frac{n(U - U_0)}{L_1 I_b} \quad (21a)$$

Das Verhältnis  $\alpha'/\tau_c$  ist offenbar eine wichtige Grösse. Die Bedingung in Gl. (21) kann durch geschickte Wahl von  $I_b$  für jeden Wert von  $\alpha'/\tau_c$  noch erfüllt werden; man muss allerdings berücksichtigen, dass  $\alpha'/\tau_c$  im Dauerbetrieb sinkt, während der Scheitwert des Basisstromes unterhalb des zulässigen Wertes bleiben muss. Anderseits folgt aus dem Vorstehenden, dass es sinnlos ist,  $I_b$  bedeutend grösser werden zu lassen, als für die Stromzunahme notwendig ist.

Durch die Schaltung der Rückkopplung nach Fig. 10 entsteht ein Basisimpuls, dessen Grösse anfänglich schnell ansteigt, um dann exponentiell abzunehmen. Die Grösse der Ladung, die der Basisimpuls darstellt, muss bei kurzen und starken Basisimpulsen grösser sein als bei längeren und schwächeren. Hieraus folgt, dass man gerne die Ladung des Rückkopplungskondensators erhöhen würde, um die Leistung des Umformers zu vergrössern. Nimmt man nun an, dass der Kollektorstrom z. B. in 10  $\mu$ s auf 4 A steigen muss, dann wird nach Gl. (21):

$$\frac{\alpha' I_b}{\tau_c} > 4 \cdot 10^5$$

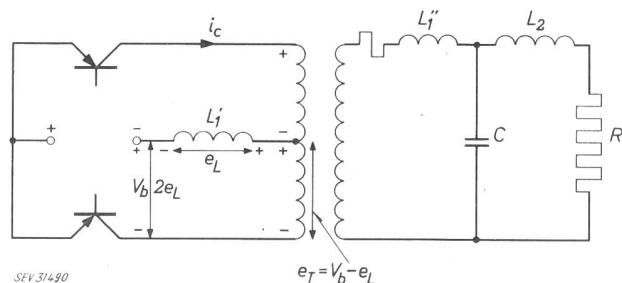


Fig. 14  
Schaltung mit geteilter Selbstinduktivität  $L_1$   
 $L_1'$  Teil im Primärkreis;  $L_1''$  Teil im Sekundärkreis

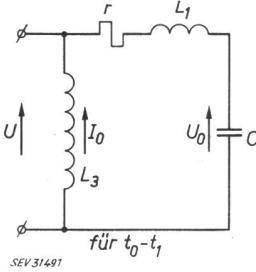


Fig. 15  
Anfangsbedingungen in unbelastetem Zustand in der Zeit  $t_0 - t_1$ , in der einer der Transistoren leitend ist  
 $U$  Transformatorspannung;  $U_0$  Kondensatorspannung im Moment  $t_0$ ;  $I_0$  Strom im Moment  $t_0$

Setzt man  $\tau_c \approx 40 \mu s$  und  $\alpha' \approx 40$  in die Gl. (21) ein, dann wird

$$I_b > 0,4 \text{ A}$$

Wenn man einen entsprechenden Teil von  $L_1$  an die Primärseite des Transformators in die gemeinsame Minusleitung nach Fig. 14 schaltet, so hat man ein einfaches Mittel, um den Basissteuerimpuls einigermaßen zu steuern. Offensichtlich wird jetzt die Rückkopplungsspannung um etwa 2mal die an  $L_1'$  liegende Spannung vermindert, während kurz darauf der Basisstromimpuls verstärkt wird. Beim Abschalten entsteht jedoch eine der Abschaltung entgegenwirkende EMK in  $L_1'$ , so dass die Grösse dieser Selbstinduktivität in Grenzen bleiben muss.

### 2.6.3 Nullastströme

Den Zustand im Leerlauf erhält man, wenn man den Zweig  $L_2$  und  $R$  in Fig. 4 weglässt. Die Parallelselfinduktivität des Transformators ist nun nicht mehr bedeutungslos und kann auch nicht vernachlässigt werden. Der Belastungskreis hat dann die in Fig. 15 wiedergegebene Form. Für das Zeitintervall  $t_0 - t_1$  gelten die Anfangsbedingungen nach Fig. 15, für das Zeitintervall  $t_1 - t_2$  jene nach Fig. 16. Von  $t_0 - t_1$  wird der Strom unter Vernachlässigung des Transformatorwiderstandes:

$$i_{tot} = \frac{U + pL_1 I_0 - U_0}{p(pL_1 + r + \frac{1}{pC})} + \frac{U}{p^2 L_3} - \frac{I_0}{p}$$

In den  $t$ -Bereich umgesetzt ergibt das:

$$i_{tot} = \operatorname{Re} \left[ \frac{U - \alpha L_1 I_0 - j\omega L_1 I_0 - U_0}{L_1(-j\omega)} e^{-\alpha t - j\omega t} \right] + \frac{Ut}{L_3} - I_0$$

Unter Vernachlässigung des Ausdrückes mit dem Koeffizienten  $r/2$   $I_0$  kommt man zu:

$$i_{tot} \approx \frac{U - U_0}{\omega L_1} e^{-\alpha t} \sin \omega t + I_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{Ut}{L_3} - I_0 \quad (22)$$

Für die Spannung am Transformator (die ungefähr gleich der Kondensatorspannung ist) findet man, wenn  $\alpha \ll \omega$  entsprechend:

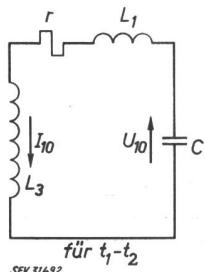


Fig. 16  
Anfangsbedingungen in unbelastetem Zustand in der Zeit  $t_1 - t_2$ , in der beide Transistoren sperren  
 $I_{10}$  Strom im Moment  $t_1$ ;  $U_{10}$  Spannung im Moment  $t_1$

$$U_c(t) \approx U(1 - e^{-\alpha t} \cos \omega t) + U_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t \quad (23)$$

Der Kreisstrom während der Zeitspanne  $t_1 - t_2$  wird dann entsprechend:

$$i \approx \frac{U_{10}}{qL_3} e^{-\gamma t} \sin q t + I_{10} e^{-\gamma t} \cos q t \quad (24)$$

und die Transformatorspannung:

$$U_c(T) \approx U_{10} e^{-\gamma t} \cos q t - \frac{I_{10}}{qC} e^{-\gamma t} \sin q t \quad (25)$$

Die numerische Berechnung für einige Fälle, z. B. mit einer geschätzten Zeit von  $t_0 - t_1$  ist zwar sehr instruktiv, würde aber zu weit führen. Man muss sich hier auf die Charakterisierung der Transistorströme beschränken.

Angenommen, dass die Leerlaufverluste sehr gering sind, dann wird wegen

$$\int_{t_0}^{t_1} U i_{tot} dt \approx 0$$

der Mittelwert  $I_d$  des Kollektorstromes während der Zeit  $t_0 - t_1$  ungefähr 0 sein. Offensichtlich fliesst dann Strom sowohl in normaler als in entgegengesetzter Richtung durch die Transistoren. Wenn man sich den Abschaltmechanismus ansieht, dann ist unschwer zu erkennen, dass die Abschaltung erst am Anfang der zweiten Periode der oszillierenden Komponente von Gl. (22) stattfinden kann. Dies ist anders im belasteten Zustand, in dem  $I_d \gg 0$  und die Abschaltung in der zweiten Hälfte der ersten Periode des Kollektorstromes stattfindet.

Nach der Abschaltung findet man im freien Schwingkreis bei Nullast immer eine grössere Selbstinduktivität bei der oben beschriebenen Schaltung, wodurch auch die Ausschwingfrequenz niedriger zu liegen kommt. Damit ergibt sich also eine geringere Schaltfrequenz bei Nullast als bei Belastung.

Da die  $RC$ -Zeit des Rückkopplungskreises konstant geblieben ist, resultiert, durch die nun stärkere Entladung von  $C$ , im Einschaltmoment  $t_2$  (siehe Fig. 11) eine niedrigere Spannung  $U_0$ . Der Beitrag des ersten Ausdruckes von Gl. (22) wird dadurch also grösser. An Hand der Gl. (25) kann man den Zeitpunkt  $t_2$  schätzen; bei niedrigem  $U_c(t)$  liegt dieser Zeitpunkt in der Nähe des Momentes, in dem der erste Ausdruck von Gl. (25) Null durchläuft. Die Grössenordnung von  $I_0$  geht aus Gl. (24) hervor:

$$I_0 \geq \frac{U_{10}}{qL_3} \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{L_3}{C}}}$$

Je später der Zeitpunkt  $t_2$  liegt, um so mehr nimmt  $I_0$  ab. Der Beitrag des zweiten Ausdrückes von Gl. (22) zum Spitzstrom ist also ebenfalls abhängig von der  $RC$ -Zeit des Rückkopplungskreises. Weiter ist  $I_{10}$ , der Strom im Augenblick  $t_1$  der Abschaltung, unter Belastung höher als bei Nullast, während  $U_{10}$  bei Belastung ein wenig niedriger wird. Nach Gl. (24) ist  $I_0$  bei Nullast dann sicher höher als bei Belastung. Das Gesamtbild zeigt deshalb bei Nullast grössere Spitzeströme in beiden Richtungen des Transistors als bei Belastung. Eine Verbesserung erzielt man durch Verkleinerung der Parallelselfinduktivität  $L_3$ , wenn dadurch auf der anderen Seite  $I_0$  auch wieder zunimmt,

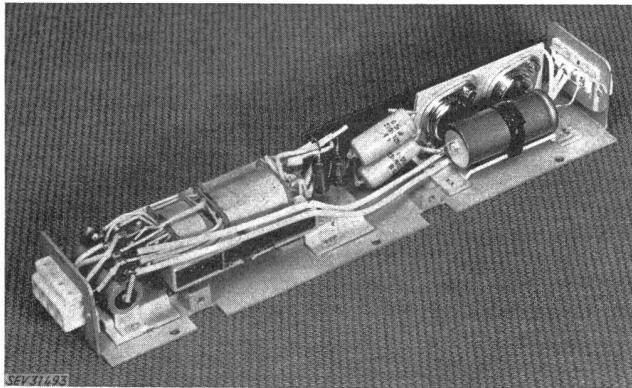


Fig. 17  
Transistorumformer für 26 V  
für eine TL-40-W-Lampe

oder durch einen kapazitiven Belastungszweig, durch den die Frequenzverschiebung umgekehrt wird. Je länger man ferner die  $RC$ -Zeit machen kann, desto niedriger sind die Spitzentströme.

#### 2.6.4 Belastungskreise

Mit einer Parallelselfinduktivität kann man dem gesamten Belastungskreis eine hohe Kreisgüte erteilen. Mit ziemlich kurzen Stossimpulsen erhält man dann über den Parallelkondensator eine ungefähr sinusförmige Spannung, an die dann weiter die Belastung (Widerstandszweig) angeschlossen wird. Eine sinusförmige Spannung hat den Vorteil, dass bekannte Schaltungen mit Varianten verwendet werden können, wie z. B. die Schaltung für Serienspeisung der Lampen [8].

Die Parallelselfinduktivität vermindert den Einfluss der Belastung auf die Frequenz, was das Ab- und Anschalten getrennter Belastungseinheiten möglich macht, z. B. 6 Lampen von 6 W usw. an einem Umformer, getrennt ab- und zuschaltbar.

Die Selbstinduktion in Serie mit der Lampe kann manchmal mit Vorteil durch einen Kondensator ersetzt werden, falls die gesamte Kreisgüte erhalten bleibt (Verkleinerung der Parallelselfinduktivität). Dies gestattet eine Verbilligung der Schaltung und bringt noch einige weitere Vorteile mit sich, wie geringe Spitzentströme im Leerlauf und kleinere Gleichrichtereffekte an der TL-Lampe.

Schliesslich ist es möglich, den Schwingkreis einseitig mit Hilfe eines einzelnen Transistors zu erregen. Dadurch lassen sich auch die im Gegentakt arbeitenden Transistoren sehr gut auswechseln, die Umformer fallen in der Herstellung gleichmässiger aus, was wiederum eine günstigere Lebensdauer bedingt.

#### 2.6.5 Praktische Anwendung

Zurzeit befinden sich Einheiten von etwa 50 W und kleiner mit Schaltfrequenzen von 8...10 kHz und einem Wirkungsgrad von rund 80% in Fabrikation.

Fig. 17 zeigt einen 26-V-Umformer einer TL-40-W-Lampe, der bereits für Großserie konstruiert wurde.

#### Literatur

- [1] Hekenkamp, Th. und J. J. Wilting: Transistorumformer zur Speisung von Leuchtstofflampen. Philips techn. Rdsch. 20(1958/59)11, S. 352...356.
- [2] Elenbaas, W.: Fluorescent Lamps and Lighting. Eindhoven: Philips 1959. S. 75.
- [3] Pye, T. R.: High-Power Transistor D. C. Converters. Electronic & Radio Engr. 36(1959)3, S. 98...105.
- [4] Nowicki, J. R.: D. C. Inverter for Fluorescent Lamps. Mullard techn. Commun. 5(1961)47, S. 276...285.
- [5] Somlyody, A.: Transistor Bias Method Raises Breakdown Point. Electronics 33(1960)2, S. 48...49.
- [6] Le Can, K. Hart und C. de Ruyter: Semiconductors, b. Large Signal Behaviour of Transistors. Eindhoven: Centrex 1962.
- [7] Jaeger, J. C.: An Introduction to the Laplace Transformation. London: Methuen 1949.
- [8] Elenbaas, W. und Th. Hekenkamp: Eine neue, ohne Starter betriebene Leuchtstofflampe. Philips techn. Rdsch. 17(1956)8, S. 260...265.

#### Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. J. J. Wilting, Abt. Licht, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Niederlande).

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Kurznachrichten über die Atomenergie

621.039.4

Zwecks Gründung eines mittelöstlichen regionalen Radioisotopeninstituts für die arabischen Länder soll ein Abkommen zwischen der Vereinigten Arabischen Republik als Gastland, anderen arabischen Staaten und der IAEA abgeschlossen werden. Das Abkommen tritt in Kraft, sobald es von mindestens vier arabischen Staaten, einschliesslich des Gastlandes, unterzeichnet worden ist. Auf Grund des Abkommens wird die Vereinigte Arabische Republik ihr staatliches Radioisotopeninstitut in Dokki, Kairo, in ein regionales Institut umwandeln; gewisse Einrichtungen und Geräte wird sie kostenlos zur Verfügung stellen und ausserdem zur Finanzierung des Institutes beitragen.

Bisher haben der Irak, Kuweit, der Libanon, Libyen und Tunesien Beiträge versprochen. Auch die IAEA ist dabei, zusätzliche Mittel aus der Zuteilung bereitzustellen, die sie aus dem erweiterten technischen Hilfeleistungsprogramm der Vereinten Nationen erhalten soll.

Das Institut soll vor allem dazu dienen, Fachleute in der Anwendung von Radioisotopen in Medizin und Landwirtschaft sowie in der Forschung mittels von Radioisotopen auf verschiedenen Wissensgebieten, wie der Hydrologie, dem Studium tropischer und subtropischer Krankheiten, der Düngemittelforschung und der Entomologie auszubilden.

Nach der Meinung des Generaldirektors der Internationalen Atomenergie-Organisation ist die Festkörperphysik ein Gebiet,

auf dem in den letzten Jahren ein sehr rascher Fortschritt zu verzeichnen war. Dies ist ein Zweig der Wissenschaft, der für die Entwicklung von Brennelementen für Kernreaktoren wichtig ist und auch für die Ausarbeitung neuer Methoden zur direkten Umwandlung von Wärme in Elektrizität Aussichten bietet; nicht zu reden von seiner Bedeutung für die aussergewöhnliche neue Lichtquelle, die als optische «Maser» (microwave amplification by stimulated emission of radiation) bezeichnet wird.

Im Jahre 1962 standen in der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Kanada, der Sowjetunion und den Vereinigten Staaten 19 Reaktoren, von 5 verschiedenen Typen, mit einer totalen Leistung von 1600 MW in Betrieb. Bis Ende 1963 wird die Zahl voraussichtlich auf 55 Reaktoren mit einer Gesamtleistung von 4500 MW steigen, welche sich in 10 Ländern befinden werden.

An der Generalkonferenz der IAEA wurde Saudi-Arabien als 78. Mitglied in die Organisation aufgenommen.

«Entreprise», der Atomflugzeugträger der USA, der in der zweiten Hälfte des Jahres 1961 seine Probefahrten begann, wurde nun der Flotte im Westatlantik zugeteilt und damit endgültig in Dienst gestellt.