

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 63 (1972)  
**Heft:** 20

**Artikel:** Die Step-recovery-Diode  
**Autor:** Henne, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915746>

### 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:** 05.02.2026

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

# Die Step-recovery-Diode

Von W. Henne

Nach einem einleitenden Vergleich zwischen der herkömmlichen *pn*-Sperrschiichtdiode und der hier zu beschreibenden Step-recovery-Diode wird gezeigt, dass sich letztere sehr gut als aktives Element eines Frequenzvervielfachers eignet. Es werden die einzelnen für diesen Frequenzvervielfacher benötigten Bauelemente und deren Berechnung aufgezeigt. Das Ausführungsbeispiel eines Frequenzvervielfachers in Koaxialtechnik beschliesst den Aufsatz.

Après une comparaison entre la diode à jonction *pn* usuelle et la diode step-recovery faisant l'objet de cet article, on montre que celle-ci convient très bien comme élément actif d'un multiplicateur de fréquence. Pour ces multiplicateurs, les divers composants nécessaires et leur calcul sont indiqués. L'article se termine par un exemple d'exécution d'un multiplicateur de fréquence en technique coaxiale.

## 1. Einleitung

Für die verschiedensten Anwendungsgebiete wird heute die benötigte Mikrowellenleistung mit Hilfe von primären oder sekundären Generatoren erzeugt. Dabei soll unter einem primären Generator ein Bauelement verstanden werden, das im stande ist, mit Hilfe bestimmter elektronischer Effekte aus der zugeführten Gleichleistung die geforderte Mikrowellenleistung zu erzeugen. Aus der Röhrentechnik sei hier das Reflexklystron, das Magnetron oder das Carcinotron als Beispiel genannt, aus der Halbleitertechnik sowohl die Gunn-, Impatt- und Tunneldiode als auch der Transistor-Oszillator.

Als sekundäre Generatoren werden die sog. Frequenzvervielfacher bezeichnet, die auf Grund der nichtlinearen Kenn-

linie ihrer aktiven Elemente (resistive oder kapazitive Diodenkennlinie) oder auf Grund eines bestimmten Speicherverhaltens der Minoritätsträger (Step-recovery-Diode) eine Oberwellenbildung ermöglichen und deren selektive Heraussiebung gestatten.

Widerstandsdioden werden heute wegen ihres relativ schlechten Wirkungsgrades kaum noch zur Frequenzvervielfachung herangezogen. Ihr Vervielfältigungsverlust beträgt etwa pro Verdopplung 10 dB. Günstigere Eigenschaften weisen hier die sog. Kapazitätsdioden auf, bei denen zur Vervielfachung die Nichtlinearität der  $C(U)$ -Kennlinie ausgenutzt wird. Strebt man aber eine möglichst grosse Ausgangsleistung bei maximalem Wirkungsgrad an, so wird die Anfälligkeit dieser mit Kapazitätsdioden bestückten Vervielfacher gegen Stör schwingungen und Hysterese-Erscheinungen sehr lästig.

Hier bietet nun die Verwendung eines relativ neuen Halbleiterelements als aktives Element in einer Vervielfacherschaltung, nämlich die sog. Step-recovery-Diode, erhebliche Vorteile. Als Richtwert sei z. B. angegeben, dass sich in einem Vervielfacher mit ihrer Hilfe die 20. Oberwelle noch mit einem Wirkungsgrad von 20% erzeugen lässt. (In der Literatur werden als weitere Namen für die hier zu beschreibende Step-recovery-Diode die Boff-Diode, Snap-Off-Diode, Charge-Storage-Diode, Löschsprung-Diode oder Speicher-Schalt Diode angegeben.)

## 2. Das Schaltverhalten der Step-recovery-Diode

Der Unterschied zwischen der herkömmlichen Sperrschiichtdiode und der hier zur Diskussion stehenden Step-recovery-Diode tritt besonders deutlich bei der Betrachtung des Schaltverhaltens beider Dioden hervor. Deren Beschreibung sei daher dem Kapitel über die Physik dieses Bauelements und dem Einsatz der Diode in der Schaltung vorangesetzt.

Fig. 1 zeigt nun folgenden Sachverhalt bei der idealen Diode, der Sperrschiichtdiode und der Step-recovery-Diode:

Während bei der sog. idealen Diode (Fig. 1a) bei Anlegen einer negativen Spannung  $u$  kein Strom  $i$  fließt, ändert er bei der Sperrschiichtdiode während der Speicherzeit  $t_s$  sein Vorzeichen, um dann während der Übergangszeit  $t_t$  exponentiell auf den Wert des Sperrstromes abzuklingen (Fig. 1b).

Bei der Step-recovery-Diode (Fig. 1c) liegen dagegen folgende Verhältnisse vor: Bei negativer Spannung  $u$  fließt während der Speicherzeit  $t_s$  ein negativer Strom, der während der ausserordentlich kurzen Übergangszeit  $t_t$  (Größenordnung

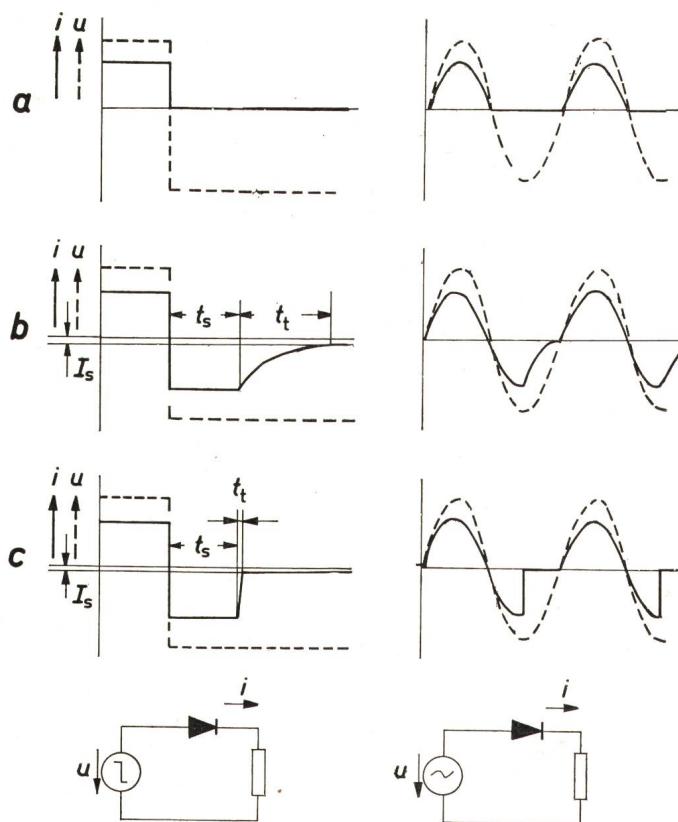


Fig. 1

Schaltverhalten der idealen Diode (a),  
der herkömmlichen Sperrschiichtdiode (b) und der Step-recovery-Diode (c)

$i$ Strom	$t_s$ Speicherzeit
$u$ Spannung	$t_t$ Übergangszeit
$I_s$ Sperrstrom	

etwa 100 ps [1<sup>1</sup>] auf den Sperrstrom abnimmt. Dieses plötzliche Abreissen des Rückstromes ermöglicht nun den so wirkungsvollen Einsatz der Step-recovery-Diode als aktives Element in Frequenzvervielfacherschaltungen.

Das beschriebene Schaltverhalten beider Diodentypen lässt sich wie folgt erklären:

### 2.1 Schaltverhalten der pn-Sperrschiichtdiode

Bei der Polung der pn-Sperrschiichtdiode in Durchlassrichtung erfolgt eine Wanderung von Ladungsträgern; und zwar wandern die Elektronen aus dem n-Gebiet, wo sie Majoritätsträger sind, durch die Sperrschiicht in das p-Gebiet, in dem sie Minoritätsträger werden. Weiter wandern die Löcher oder Defektelektronen aus dem p-Gebiet, wo sie Majoritätsträger sind, durch die Sperrschiicht in das n-Gebiet, in dem sie ihrerseits Minoritätsträger werden. Beide Minoritätsträgerarten vermehren in den jeweiligen Gebieten die bereits vorhandenen Minoritätsträgerdichten  $n_p$  und  $p_n$  [2] und zwar nach dem bekannten Massenwirkungsgesetz

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \quad \text{und} \quad p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \quad (1)$$

Mit zunehmendem Abstand vom pn-Übergang nehmen die Minoritätsträger etwa exponentiell infolge Rekombination ab. Masszahl für diese Rekombination ist die «mittlere Lebensdauer  $\tau$ »;  $\tau$  gibt diejenige Zeit an, nach der die Anzahl der Minoritätsträger auf den  $1/e$ -fachen Teil abgeklungen ist.  $\tau$  ist bei gegebener Diode abhängig von der Umgebungstemperatur und dem Flußstrom [3] und liegt in der Größenordnung  $\tau = 0,5 \dots 500$  ns (Fig. 2).

Wird nun z. Z.  $t = 0$  (Fig. 3) die Spannung an der Diode umgepolt, so diffundieren die Minoritätsträger durch die Sperrschiicht zurück. Und zwar gilt jetzt für die einzelnen Zeitabschnitte:

$0 < t < t_s$ : Die Minoritätsträger in unmittelbarer Umgebung des pn-Überganges halten während der Zeit  $0 < t < t_s$  den Rückstrom (Ausräumstrom)  $I_R$  nahezu konstant.

$t_s < t < t_t$ : Nachdem die unmittelbare Umgebung des pn-Überganges infolge des Rückstromes und auch durch Rekombination vollkommen an Minoritätsträgern verarmt ist, können auch weiter entfernte Minoritätsträger durch den pn-Übergang zurückdiffundieren. Innerhalb dieser sog. Übergangszeit  $t_t$  sinkt der Rückstrom  $I_R$  etwa exponentiell auf den statischen Sperrstrom  $I_s$  [1].

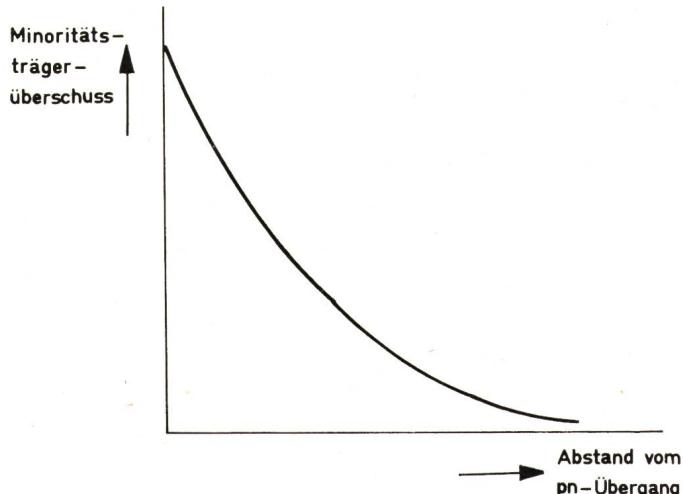


Fig. 2  
Abhängigkeit des Minoritätsträgerüberschusses im Abstand vom pn-Übergang

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

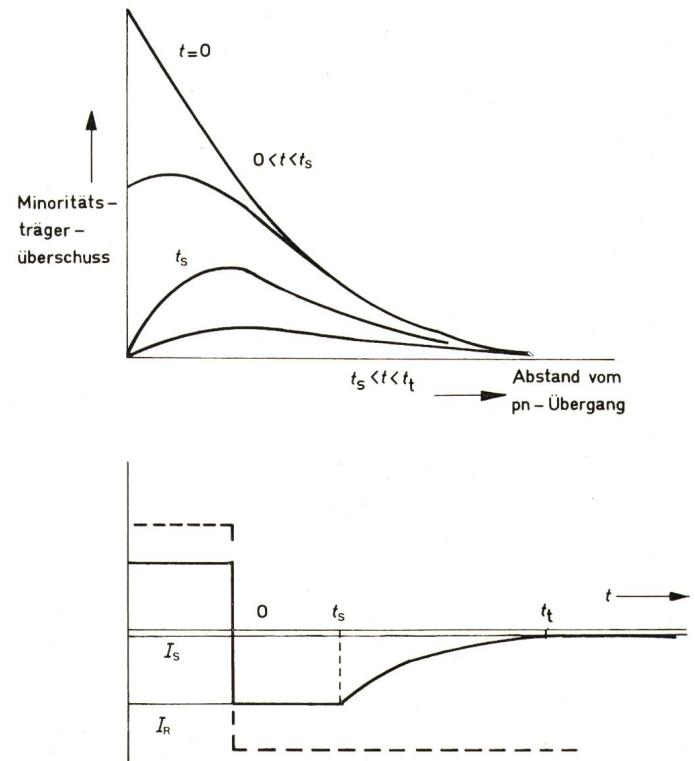


Fig. 3  
Zur Erklärung des Schaltverhaltens einer pn-Sperrschiichtdiode

$t$ Zeit	$I_s$ Sperrstrom
$t_s$ Speicherzeit	$I_R$ Rückstrom
$t_t$ Übergangszeit	

### 2.2 Schaltverhalten der Step-recovery-Diode

Wird die Step-recovery-Diode in Durchlassrichtung gepolt, so erfolgt ähnlich wie bei der pn-Sperrschiichtdiode eine Wanderung von Ladungsträgern. Infolge des speziellen Diodenaufbaus, den Fig. 4 zeigt, bleiben hier aber die aus dem Ladungstransport resultierenden Minoritätsträger in unmittelbarer Nähe des pn-Übergangs.

In Fig. 4 ist der Aufbau des aktiven Teils einer Step-recovery-Diode von Hewlett-Packard [1] schematisch dargestellt. Auf dem  $n^+$ -Träger, d. h. einem n-dotierten Material besonders hoher Leitfähigkeit, befindet sich eine in Epitaxialtechnik aufgebrachte, etwa 1 nm dicke n-leitende Schicht, darüber die etwa 5 nm starke p-Schicht. Diese p-Schicht wird abweichend von der üblichen Technik durch eine Golddiffusionschicht begrenzt. Diese sorgt nun dafür, dass die Minoritätsträger bei der in Durchlassrichtung gepolten Diode in unmittelbarer Nähe des pn-Überganges verharren [4]. Polt man nun die Diode in Sperrrichtung, so fliesst wie bei der pn-Sperrschiichtdiode ein Rückstrom. Ist aber als dessen Folge die in der Nähe der Sperrschiicht gespeicherte Ladung abgeflossen, so sinkt der Rückstrom in ausserordentlich kleiner Zeit (Größenordnung  $t_t = 100 \dots 300$  ps) auf den statischen Wert des Sperrstromes  $I_s$  ab (vgl. Fig. 1), wobei die Ladung bei positiver Polung ( $+Q$ ) gleich der Ladung bei negativer Polung ( $-Q$ ) der Diode sein muss.

Die Vorspannung der Diode wird nun zweckmässig so gewählt, dass der Strom im Schaltmoment gerade sein Maximum erreicht. Dieser Zeitpunkt wird, wie Fig. 5 zeigt, gerade dann erreicht, wenn die negative Vorspannung der Diode etwa gleich dem 3. Teil der angelegten Wechselspannungsamplitude ist. In diesem Fall wird der Strom im Schaltmoment etwa gleich dem 1,26fachen Wert des in Durchlassrichtung vorhandenen Spitzenwertes.

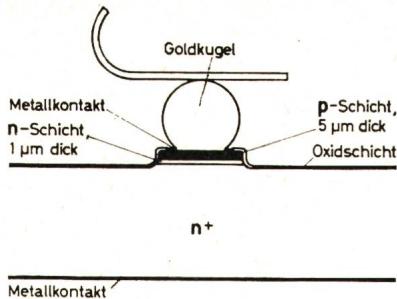


Fig. 4  
Aufbau einer  
Step-recovery-Diode

### 3. Die Step-recovery-Diode als Frequenzvervielfacher

#### 3.1 Blockschaltbild

Fig. 6 zeigt das Blockschaltbild eines Frequenzvervielfachers mit der als Impulserzeuger eingesetzten Step-recovery-Diode. Auf den Oszillator mit der Eingangsfrequenz  $f_i$  folgt ein Netzwerk, das den mit der Step-recovery-Diode bestückten Impulserzeuger an den Generator anpasst. Auf den Impulserzeuger folgt aus Anpassungszwecken ein zunächst breitbandiges Ausgangsfilter, das neben der gewünschten Ausgangsfrequenz  $f_0 = n f_i$  noch deren Nachbarfrequenzen durchlässt. Ein Bandpass grosser Güte kann an dieses angekoppelt werden und liefert an die Last  $Z$  nur noch die gewünschte Vielfache  $f_0 = n f_i$ .

Die in Fig. 6 dargestellten Blöcke sollen nun im einzelnen näher erklärt werden.

#### 3.2 Der Impulserzeuger

3.2.1 Impulserzeugung. Der Signalgenerator liefert an den Impulsformer eine Spannung der Frequenz  $f_i = 1/T_i$ , wobei  $T_i$  die Periodendauer dieser Eingangsfrequenz ist. In Abhängigkeit von der Zeit  $t$  liegen dabei folgende Verhältnisse vor:

$$0 < t < (T_i/2 + t_s):$$

Die Diode ist geöffnet. Es fließt Strom und die Induktivität  $L$  speichert die Energie

$$W = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2)$$

( $L$  = Speicherinduktivität; driving inductance)

$$t = T_i/2 + t_s:$$

Es fließt der Augenblicksstrom  $I_p$ . Damit speichert die Induktivität  $L$  in diesem Augenblick die Energie

$$W_p = \frac{1}{2} L I_p^2 \quad (3)$$

$$(T_i/2 + t_s) < t < T_i:$$

Die Diode ist gesperrt und der Ladestrom verschwindet. Damit liegt die gesamte vorher in der Induktivität gespeicherte Energie als elektrische Energie an der Sperrsichtkapazität  $C_j$  der Step-recovery-Diode.

$$\frac{1}{2} L I_p^2 = \frac{1}{2} C_j U_p^2 \quad (4)$$

Wie in [6] und einem noch folgenden Beispiel begründet, wird der Wirkungsgrad der Frequenzvervielfachung besonders

gross, wenn mit Hilfe der Vorspannung (vgl. dazu Fig. 5) die Länge des Stromimpulses  $t_p$  (vgl. Fig. 7) zwischen den Werten

$$\frac{1}{2f_0} < t_p < \frac{1}{f_0} \quad (5)$$

zu liegen kommt, wobei  $f_0 = n f_i$  die Ausgangsfrequenz ist.

3.2.2 Diodenauswahl. Die Diode wird nach ihrer Sperrsichtkapazität ausgesucht; und zwar soll bei einem  $50\Omega$ -System sein [6]:

$$10 \Omega < X_j < 20 \Omega \quad (6)$$

wobei

$$X_j = \frac{1}{2 \pi f_0 C_j} \quad (7)$$

Für die Sperrsichtkapazität der Step-recovery-Diode ergibt sich damit die zugeschnittene Grössengleichung

$$C_j = \frac{1}{2 \pi f_0 X_j} = \frac{159 \text{ pF}}{(f_0/\text{GHz})(X_j/\Omega)} \quad (8)$$

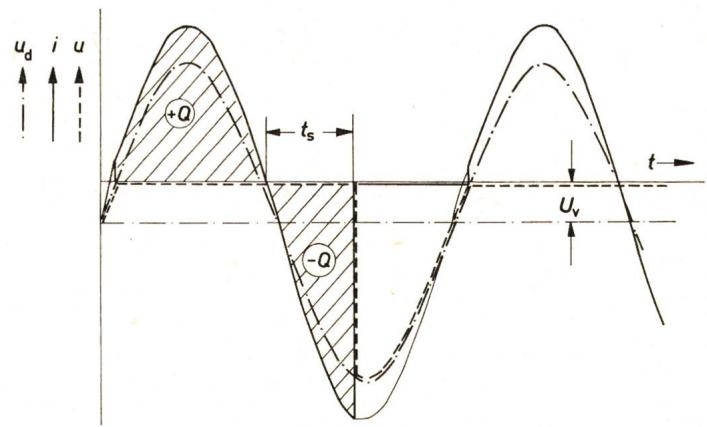


Fig. 5  
Stromverlauf in der negativ vorgespannten Step-recovery-Diode

$u_d$  Spannung an der Diode    $t_s$  Speicherzeit  
 $u$  Spannung    $U_v$  Vorspannung  
 $i$  Strom    $Q$  Ladung  
 $t$  Zeit

3.2.3 Speicherinduktivität. Der Kreis, bestehend aus Speicherinduktivität  $L$  und Sperrsichtkapazität  $C_j$ , wird auf die zu erzielende Oberwelle abgeglichen. Damit wird:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC_j}} \quad (9)$$

Mit Gl. (5) wird nun

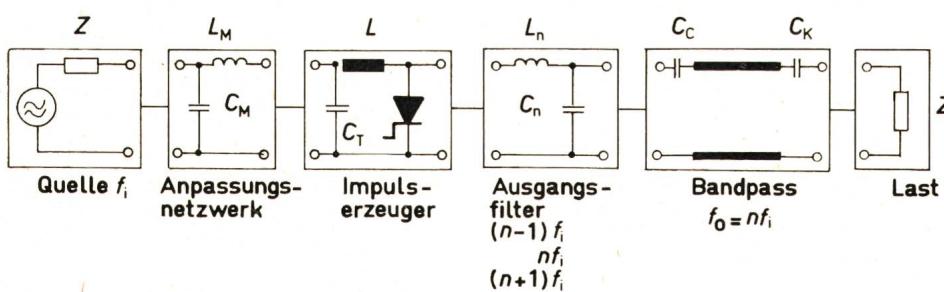
$$f_0 = \frac{1}{2t_p} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC_j}} \quad (10)$$

womit sich schliesslich eine Bestimmungsgleichung für die Speicherinduktivität  $L$  ergibt:

$$L = \left[ \frac{t_p}{\pi} \right]^2 \frac{1}{C_j} = \frac{t_p^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{C_j} \quad (11)$$

Fig. 6  
Blockschaltbild eines Frequenzvervielfachers

$Z$	Lastwiderstand = Systemwiderstand
$L_M$	Anpassungsinduktivität
$L$	Speicherinduktivität
$L_n$	Filterinduktivität
$C_C$	Koppelkapazität
$C_M$	Anpassungskapazität
$C_n$	Filterkapazität
$C_T$	Abstimmkondensator
$f_i$	Eingangsfrequenz
$f_0$	Ausgangsfrequenz
$n$	Vervielfachungsgrad
$C_k$	Ankoppelkondensator



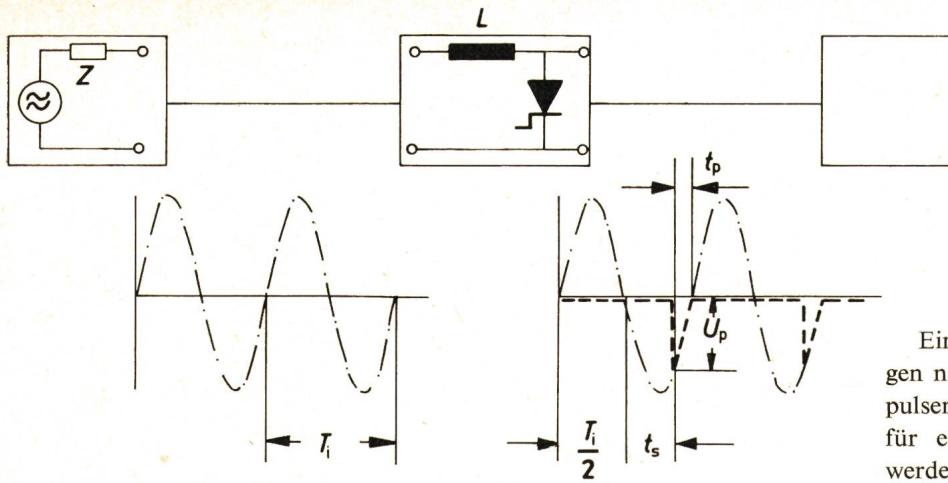


Fig. 7  
Impulserzeuger einer Vervielfacherstufe  
Z Systemwiderstand  
L Speicherinduktivität  
T<sub>i</sub> Periodendauer der Eingangsfrequenz  
t<sub>p</sub> Impulsdauer  
t<sub>s</sub> Speicherzeit  
U<sub>p</sub> Spannungsimpuls

3.2.4 Abstimmkondensator C<sub>T</sub>. Der Abstimmkondensator C<sub>T</sub> stimmt bei geöffneter Diode die Speicherinduktivität auf die Eingangsfrequenz f<sub>i</sub> ab.

$$C_T = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{f_i^2} \cdot \frac{1}{L} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{f_i^2} \cdot \frac{\pi^2}{t_p^2} C_j = \frac{1}{(2f_i t_p)^2} C_j \quad (12)$$

3.2.5 Eingangswiderstand des Impulserzeugers. Nach [5] beträgt der Eingangswiderstand des Impulserzeugers:

$$R_{in} = w_i L \quad (13)$$

Er ist reell.

### 3.3 Das Anpassungsnetzwerk

Das Anpassungsnetzwerk berechnet sich unter der Voraussetzung, dass der Generatorwiderstand R<sub>g</sub> gegenüber dem Eingangswiderstand R<sub>in</sub> gross ist, d. h. für

$$R_g \geq 10 R_{in} \quad (14)$$

zu:

$$X_M = w_i L_M = \frac{1}{w_i C_M} = \sqrt{R_g R_{in}} \quad (15)$$

Damit wird

$$L_M = \frac{1}{2\pi f_i} \sqrt{R_g R_{in}} \quad (16)$$

$$C_M = \frac{1}{2\pi f_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_g R_{in}}} \quad (17)$$

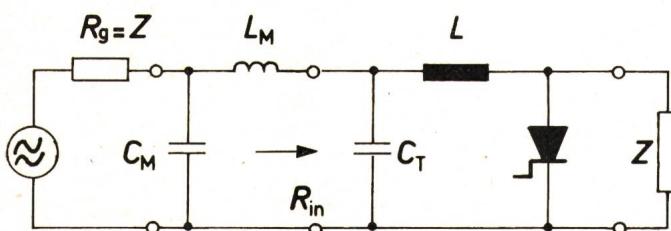
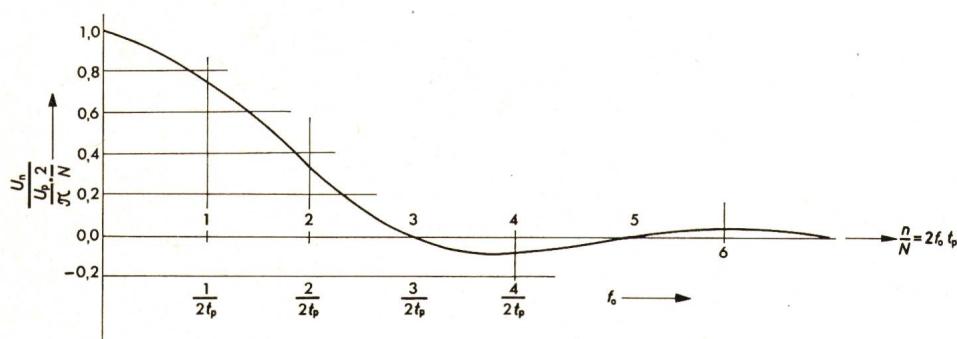


Fig. 8  
Impulserzeuger mit Step-recovery-Diode

R <sub>g</sub>	=	Z
R <sub>in</sub>	=	Abstimmkondensator
L	=	Lastwiderstand
L <sub>M</sub>	=	= Systemwiderstand
C <sub>M</sub>	=	Anpassungskapazität



Ein Beispiel soll die angegebenen Gleichungen näher erläutern; und zwar möge ein Impulserzeuger und ein Anpassungsnetzwerk für einen Frequenzverfünffacher berechnet werden, bei dem die Eingangsfrequenz f<sub>i</sub> =

60 MHz, die Ausgangsfrequenz f<sub>0</sub> = 300 MHz und der Wellenwiderstand (Systemwiderstand) des Vervielfachers Z = 50 Ω betragen soll. Fig. 8 zeigt die der Berechnung zugrunde gelegte Schaltung.

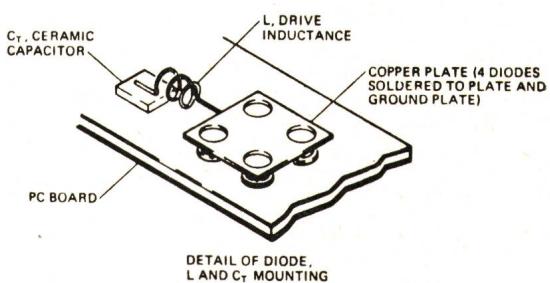


Fig. 9  
Mechanischer Aufbau eines Impulserzeugers eines Frequenzverfünffachers  
f<sub>i</sub> = 60 MHz; f<sub>0</sub> = 300 MHz

Für die erforderliche Kapazität erhält man nach Gl. (8):

$$C_j = \frac{159 \text{ pF}}{0,3 (10...20)}$$

C<sub>j</sub> = (53...26,5) pF gewählt: C<sub>j</sub> = 35 pF (4 Dioden parallel) während für die Stromimpulsdauer t<sub>p</sub> hier mit Gl. (5)

$$t_p = \frac{1}{2f_0} = \frac{1}{2 \cdot 0,3 \text{ GHz}} = 1,66 \text{ ns}$$

gewählt wird. Für die Grösse der Speicherinduktivität erhält man mit Gl. (11)

$$L = \frac{2,75}{\pi^2} \cdot \frac{1000 \text{ nH}}{35} = 7,95 \text{ nH} \quad L = 8 \text{ nH}$$

und für den Abstimmkondensator C<sub>T</sub> aus Gl. (12):

$$C_T = \frac{35 \text{ pF}}{4 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,75} = 865 \text{ pF} \quad C_T = 865 \text{ pF}$$

Der Eingangswiderstand des Impulserzeugers wird mit Gl. (13):

$$R_{in} = 2\pi \cdot 0,06 \cdot 8 \Omega = 3 \Omega \ll Z = 50 \Omega \quad R_{in} = 3 \Omega$$

Fig. 10  
Amplitudenspektrum der von der Step-recovery-Diode erzeugten Impulsfolge  
U<sub>n</sub> Spannung beim Vervielfachungsgrad n  
U<sub>p</sub> Spannungsimpuls  
n Vervielfachungsgrad  
N Zeitverhältnis N = T<sub>i</sub>/2t<sub>p</sub>  
f<sub>0</sub> Ausgangsfrequenz  
t<sub>p</sub> Impulsdauer

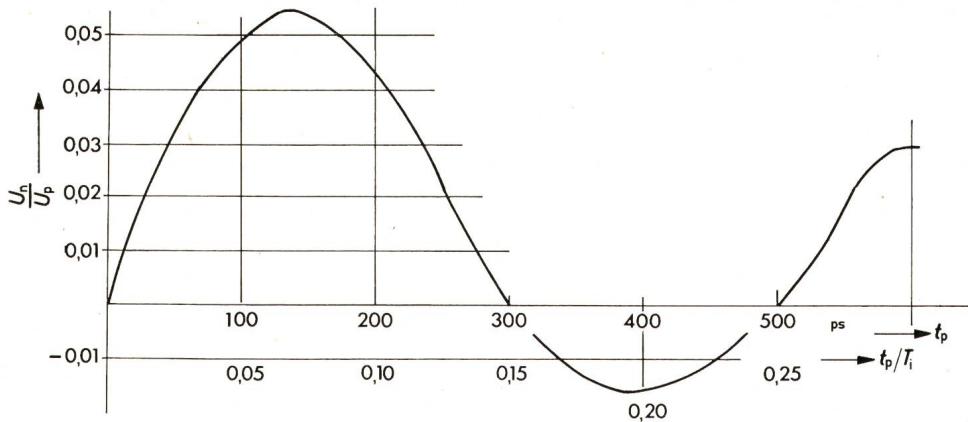


Fig. 11  
Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses  
 $U_n/U_p$  von der Impulsdauer  $t_p$   
 $U_n$  Spannung beim  
Vervielfältigunggrad  $n$   
 $U_p$  Spannungsimpuls  
 $T_i$  Periodendauer der Eingangsfrequenz

Das Anpassungsnetzwerk mit den Elementen  $L_M$  und  $C_M$  wird mit den Gln. (16) und (17) bestimmt. Und zwar ergibt sich nach Gl. (16) für die Anpassungsinduktivität  $L_M$ :

$$L_M = 159 \text{ nH} \frac{\sqrt{50 \cdot 3}}{60} = 32,5 \text{ nH} \quad L_M = 32,5 \text{ nH}$$

und nach Gl. (17) für die Anpassungskapazität  $C_M$ :

$$C_M = \frac{159 \text{ pF}}{60} \cdot \frac{1}{\sqrt{50 \cdot 3}} = 0,216 \text{ nF} \quad C_M = 216 \text{ pF}$$

Fig. 9 zeigt einen Schaltungsaufbau, wie er in [6] für die Zusammenschaltung der Abstimmkapazität  $C_T$ , der Speicherinduktivität  $L$  und der im Beispiel mit  $C_j = 35 \text{ pF}$  erhaltenen 4 Dioden vorgeschlagen wurde.

#### 3.4 Amplitudenspektrum des Impulserzeugers

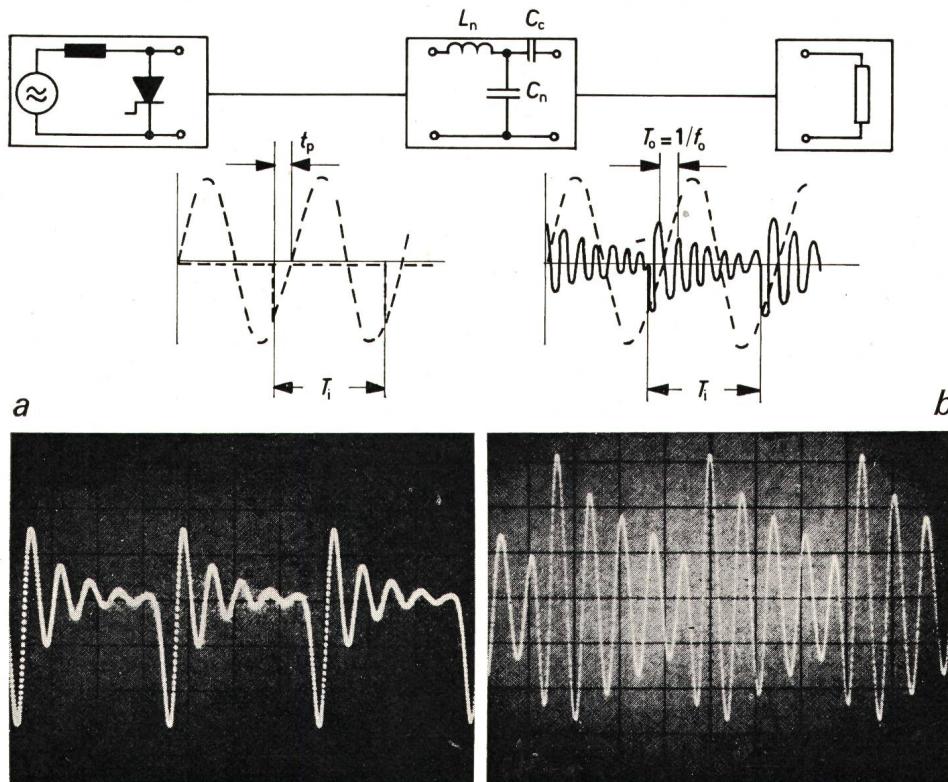
Die Fourier-Zerlegung der mit der Step-recovery-Diode erzeugten Impulsfolge nach Fig. 5 und 7 ergibt [5]:

$$U_n = \frac{U_p}{\pi} \cdot \frac{2}{N} \cdot \frac{1}{1 - (n/N)^2} \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n}{N} \quad (18)$$

mit

$$N = \frac{T_i}{2t_p} \quad (19)$$

Die graphische Auswertung der Gl. (18) zeigt Fig. 10.



Die beiden hier gewählten Abszissen lassen sich wie folgt ineinander überführen:

$$\frac{n}{N} = \frac{f_0/f_i}{N} = \frac{f_0 \cdot 2t_p}{f_i T_i} = 2f_0 t_p \quad (20)$$

Die 1. Nullstelle des in Fig. 10 dargestellten Spektrums befindet sich bei

$$\frac{n}{N} = 3 \text{ bzw. } f_0 = \frac{3}{2t_p}$$

Ein Zahlenbeispiel soll den Gebrauch des in Fig. 10 dargestellten Amplitudenspektrums erläutern: Und zwar sei als Ausgangsfrequenz eines Frequenzverzehnfachers  $f_0 = 10f_i = 5000 \text{ MHz}$  gefordert. Gesucht ist das Verhältnis der Spannungsamplituden  $U_n/U_p$ , wenn z. B. die Impulsdauer  $t_p = 150 \text{ ps}$  beträgt. Außerdem sei die Abhängigkeit dieses Verhältnisses von der Impulslänge  $t_p$  gesucht. Man erhält zunächst mit Hilfe der Fig. 10:

$$\frac{n}{N} = 2f_0 t_p = 2 \cdot 5 \cdot 10^9 \cdot 0,15 \cdot 10^{-9} = 1,5 \rightarrow \frac{U_n}{U_p \cdot \frac{2}{\pi \cdot N}} = 0,56$$

$$\frac{U_n}{U_p} = 0,56 \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{N} = \frac{1,12}{\pi} \cdot \frac{2t_p}{T_i} = \frac{2,24 \cdot 0,15 \cdot 10^{-9}}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-9}} = 0,0535$$

Fasst man nun die Impulsdauer  $t_p$  als Variable auf, so erhält man für dieses gegebene Beispiel die in Fig. 11 dargestellte Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses von dieser Impulsdauer. Das Maximum liegt zwischen

$$100 < t_p < 200 \quad (t_p \text{ in ps})$$

Fig. 12  
Ausgangsfilter eines mit einer Step-recovery-Diode bestückten Frequenzvervielfächers mit den dazugehörigen Oszillogrammen

a  
gedämpfte Wellenform für  $t_p = 1/2 f_0$   
Skala: vertikal 10 V/cm, horizontal 5 ns/cm

b  
gedämpfte Wellenform für  $t_p = 1/f_0$   
Skala: vertikal 5 V/cm, horizontal 5 ns/cm

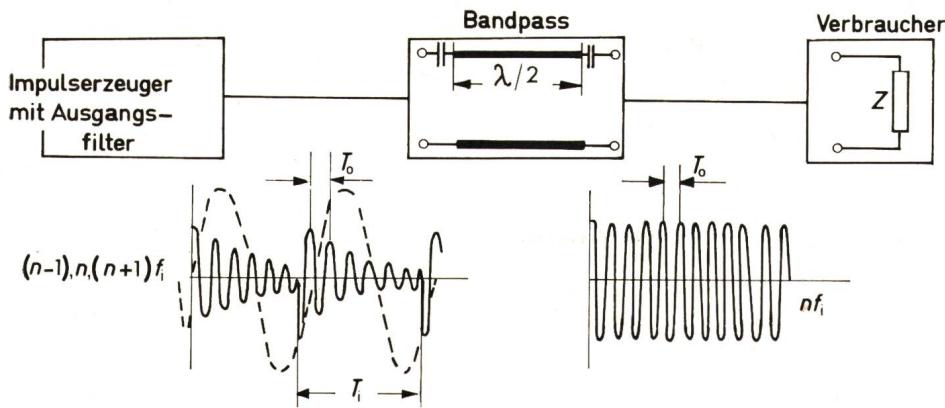


Fig. 13  
Ausgangsnetzwerk eines  
Frequenzvervielfachers

$T_0$  Periodendauer der Ausgangsfrequenz  
 $T_i$  Periodendauer der Eingangsfrequenz  
 $\lambda$  Wellenlänge  
 $n$  Vervielfachungsgrad  
 $f_i$  Eingangsfrequenz  
 $Z$  Systemwiderstand

Fig. 14  
Querschnitt durch einen Frequenzvervielfacher

was genau der durch Gl. (5) gemachten Aussage für  $f_0 = 5000$  MHz entspricht

$$\frac{1}{2f_0} < t_p < \frac{1}{f_0} \quad (5)$$

### 3.5 Ausgangsfilter

Wie bereits Fig. 6 zeigte, folgt auf den Impulserzeuger das Ausgangsfilter. Fig. 12 zeigt dieses in der Blockschaltung mit den dazugehörigen Zeitverläufen von Eingangs- und Ausgangsspannung.

Die Elemente dieses Filters lassen sich nach folgenden Gleichungen [6] berechnen:

$$C_c = \frac{1}{w_0 Z \cdot 2n} \quad (21)$$

$$C_n = \frac{1}{w_0^2 L_n} - C_c \quad (22)$$

$$L_n = L \quad (23)$$

### 3.6 Bandpass

Auf das Ausgangsfilter, das außer der gewünschten Frequenz  $f_0 = nf_i$  noch die beiden Seitenfrequenzen  $(n-1)f_i$  und  $(n+1)f_i$  durchlässt, folgt nun der schmalbandige Bandpass, der z. B. als  $\lambda/2$ -Leitung ausgebildet sein kann, wie in Fig. 13 schematisch dargestellt ist.

Der Ankoppelkondensator  $C_k$  errechnet sich mit Hilfe der Gl. (24) zu

$$C_k = \frac{1}{w_0 Z} \cdot \frac{\pi/4}{2n} \quad (24)$$

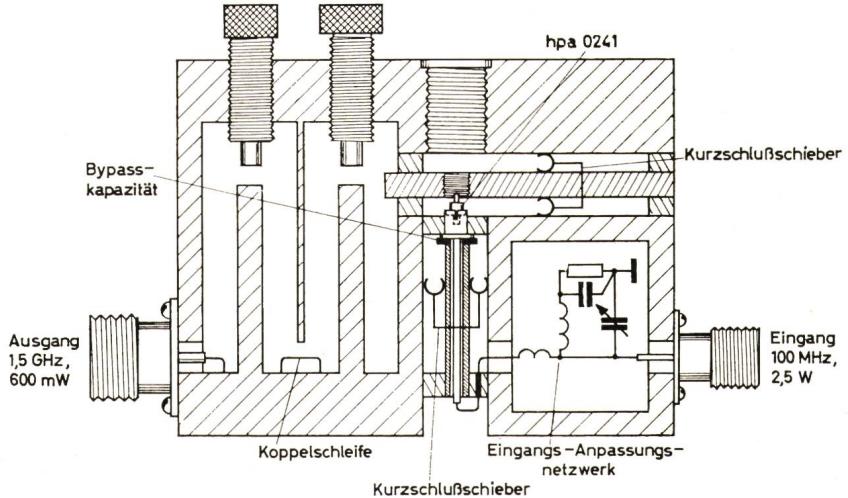
Abschliessend zum Kapitel 3 seien noch die fehlenden Elemente  $L_n$ ,  $C_c$ ,  $C_n$  und  $C_k$  des Frequenzvervielfachers mit  $f_i = 60$  MHz und  $f_0 = 300$  MHz zahlenmäßig berechnet

Nach Gl. (23):  $L_n = L = 8 \text{ nH}$

Nach Gl. (21):  $C_c = \frac{159 \text{ pF}}{0,3 \cdot 50} = 10,6 \text{ pF} \quad C_c = 10,6 \text{ pF}$

Nach Gl. (22):  $C_n = \frac{25,33 \text{ pF}}{0,09 \cdot 8} - 10,6 \text{ pF} \quad C_n = 24,4 \text{ pF}$

Nach Gl. (24):  $C_k = \frac{159 \text{ pF}}{0,3 \cdot 50} \cdot \frac{\pi/4}{10} \quad C_k = 3 \text{ pF}$



## 4. Schaltungsausführungen

Fig. 14 zeigt den Querschnitt durch einen Frequenzvervielfacher, bestückt mit der Step-recovery-Diode hpa 0241 [1].

Bei einer Eingangsfrequenz  $f_i = 100$  MHz und der Eingangsleistung  $P_i = 2,5$  W wird bei Frequenzverfünfzehnfachung, d. h. bei einem  $\times 15$ -Multiplierv, eine Ausgangsleistung  $P_0 = 0,6$  W bei  $f_0 = 1,5$  GHz erzielt. Der Ausgangskreis dieses Vervielfachers besteht aus einem magnetisch gekoppelten Zweikreisfilter und lässt sich mit Hilfe der beiden Abstellschrauben über den Frequenzbereich von 1,1...1,6 GHz durchstimmen.

## Literatur

- [1] W. Henne: Die Step-recovery-Diode als Frequenzvervielfacher. Internat. Elektron. Rdsch. 21(1967)4, S. 87...90.
- [2] W. Henne: Das Bändermodell von Halbleiterdioden. Bull. SEV 63 (1972)12, S. 632...642.
- [3] G. Oswald: Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten der Speicher-Schalt-Diode. Siemens Z. 38(1964)3, S. 164...168.
- [4] P. Bobisch und C. Sondhauss: Die Speicher-Schaltdiode und ihre Wirkungsweise als Frequenzvervielfacher. Internat. Elektron. Rdsch. 23 (1969)8, S. 213...215.
- [5] S. Hamilton and R. Hall: Shunt-mode harmonic generation using step recovery diodes. Microwave J. 10(1967)5, p. 69...78.

## Adresse des Autors:

Dr.-Ing. W. Henne, Professor an der Fachhochschule Augsburg, Haferstrasse 20d, D-8903 Haunstetten.