

# Ein preisgünstiger Funktionsgenerator für Lehrzwecke

Dipl.-Ing. Hans Prechtl

Dieser Beitrag beschreibt als Nachbausaltung einen Funktionsgenerator, der äußerst vielseitig einsetzbar und zudem ungewöhnlich preisgünstig ist. So betragen zum Beispiel die Materialkosten (ohne Gehäuse) weniger als 300 DM. Das „Herz“ dieses Geräts bildet ein monolithisch integrierter Funktionsgenerator Typ XR 205, der von der amerikanischen Firma Exar Integrated Systems, Inc. entwickelt wurde. Dieser in einem Dual-in-Line-Gehäuse angebotene Baustein erzeugt Sinus-, Rechteck-, Dreieck- und Sägezahnspannungen im Frequenzbereich 1 Hz..800 kHz, die sich sowohl amplituden- als auch frequenzmodulieren lassen. Mit einem zusätzlichen, im Gerät bereits eingebauten Sägezahnspannungsgenerator lassen sich darüber hinaus auch Wobbelmessungen durchführen. Damit ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, die durch zahlreiche, anschauliche Oszillogramme belegt sind.

## 1 Schaltungsbeschreibung

### 1.1 Blockschaltung

Der mit „Funktionsgenerator“ bezeichnete Block in Bild 1 enthält neben der eigentlichen Funktionsgenerator-IS die Abgleichpotentiometer und die Umschalter für die jeweiligen Wellenformen, die Frequenzbereichumschalter sowie die Einstellelemente für Ausgangsamplitude und Offsetspannung. Um die durch die IS gegebenen Möglichkeiten der Frequenz- und Amplitudenmodulation auszunutzen, gewinnt man die Modulationsspannungen für FM bzw. AM durch Vorschalten geeigneter Modulationsverstärker (2) bzw. (3) vor den VCO- bzw. Multiplikatoreingang der IS. Der Verstärker (2) für FM stellt einen aus der Analogrechenetechnik bekannten Summierverstärker [1] dar, wodurch die Ausgangsfrequenz sowohl von der Einstellung des Potentiometers „Frequenz“ als auch von einer eventuell zugeführten Modulationsspannung abhängt. Der AM-Verstärker (3) wurde als Inverter geschaltet, der für die nötige Anpassung des AM-Eingangs an den Multiplikatoreingang der IS sorgt. Der Sägezahngenerator (4) liefert eine linear von  $-2\text{ V}$  bis  $+2\text{ V}$  und von  $0$  bis  $+2\text{ V}$  ansteigende Spannung für eine interne Frequenzmodulation bzw. Amplitudenmodulation. Ein Schalter erlaubt in weiten Grenzen eine Anpassung der Periodendauer des Sägezahns an die jeweilige Meßaufgabe.

Die folgende Gleichung gibt den Zusammenhang zwischen der Amplitudenmodulationsspannung  $U_{AM}$  und dem Scheitelwert der Ausgangsamplitude  $U_a$  wieder:

$$U_a = \frac{U_{AM}}{2\text{ V}} \cdot U_{a\text{ max}} \text{ für } 0 \leq U_{AM} \leq +2\text{ V} \quad (1)$$

### 1.2 Gesamtschaltung (Bild 2)

Die Aufgabe besteht zunächst darin, einen Generator aufzubauen, bei dem die Frequenz durch eine extern zugeführte Spannung geändert werden kann (VCO). Hierauf ist die Wellenform dieser Frequenz in der gewünschten Weise einzustellen (Sinus, Dreieck, Rechteck usw.). Die so ausgewählte Spannungsform ist nun noch mit Hilfe eines Multiplikators (X) und einer von außen zugeführten Spannung in ihrer Amplitude zu variieren (Amplitudenmodulation) und schließlich in einem Ausgangsverstärker (A) auf eine möglichst niedrige Ausgangsimpedanz zu transformieren. Alle diese Aufgaben erfüllt der monolithisch integrierte Funktionsgenerator Typ XR 205.

#### 1.2.1 Frequenzeinstellung

Frequenz kann durch Veränderung der Kapazität eines Kondensators variiert werden. Stuft man daher die

Kondensatoren C 10 bis C 15 (siehe Bild 2) in geeigneter Weise ab, so erhält man eine Umschaltmöglichkeit für sechs dekadische Frequenzbereiche. Will man eine Frequenzfeineinstellung im Bereich 10 : 1 durchführen, so muß man den Wert des eingepprägten Stromes durch den Multivibrator verändern. Dies ist zwar innerhalb der IS nicht möglich, man kann jedoch durch Einspeisen oder Abzweigen eines zusätzlichen Stromes an Anschluß 13 diesen eingepprägten Strom verändern. Dies geschieht durch den Summierverstärker IS 3 sowie über die Widerstände R 38 und R 39 (Bild 2). Mit dem Potentiometer R 45 (Frequenzgrob) läßt sich dem einen Eingang des Summierverstärkers eine Spannung zwischen etwa  $-4\text{ V}$  und  $+4\text{ V}$  zuführen, während ein zweiter Eingang eine durch R 41 in der Amplitude veränderliche Modulationsspannung erhält. Diese kann entweder extern zugeführt oder dem internen Sägezahngenerator entnommen werden. R 33 und R 34 ermöglichen einen einfachen Abgleich der Offsetspannung von IS 3, während R 35, C 18 und C 19 zur individuellen Einstellung des Frequenzganges dieser IS dienen. Die Dioden D 4 und D 5 gewährleisten einen ausreichenden Schutz vor zu hohen Eingangsspannungen. Der Ausgang von IS 3 wird über R 46 einer Buchse „Frequenzanaloger Ausgang“ zugeführt. Wird dieser mit dem Horizontaleingang eines Oszillografen verbunden, so erhält man eine der momentanen Frequenz proportionale Ablenkung, was besonders bei Wobbelmessungen vorteilhaft ist. In diesem

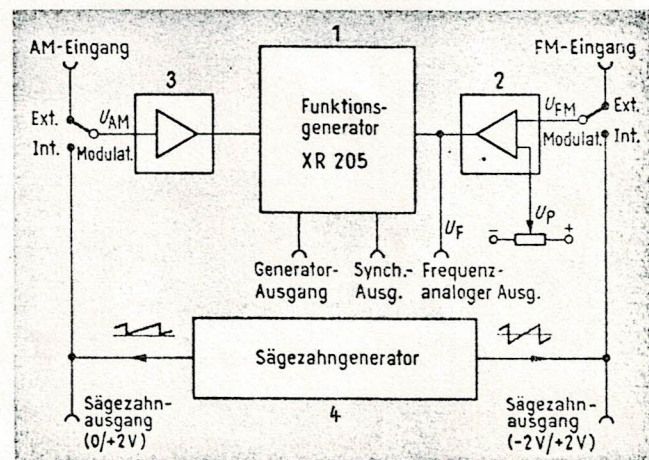
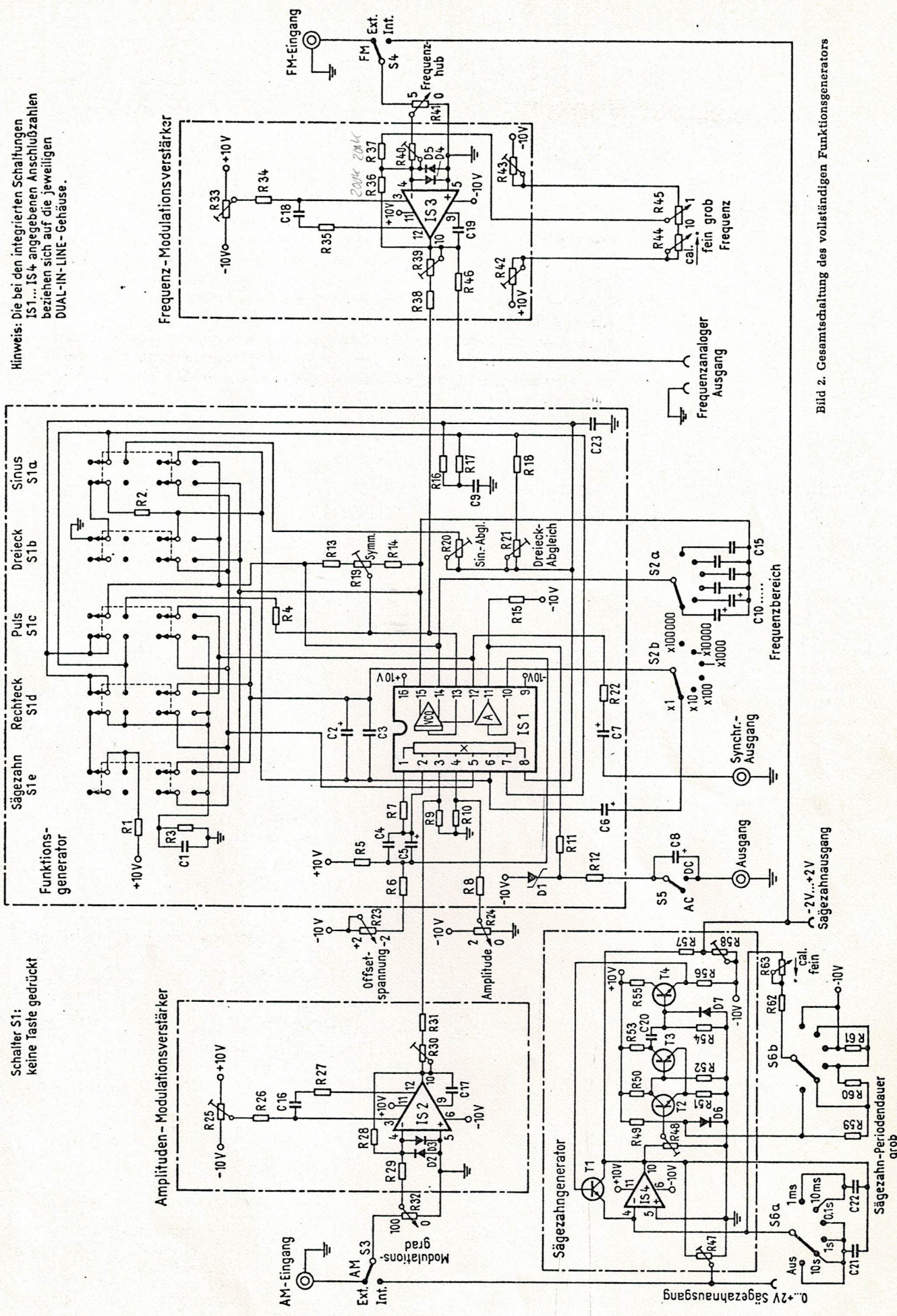


Bild 1. Blockschaltung des Funktionsgenerators



Hinweis: Die bei den integrierten Schaltungen IS1...IS4 angegebenen Anschlußzahlen beziehen sich auf die jeweiligen DUAL-IN-LINE-Gehäuse.

Schalter S1: keine Taste gedrückt

Bild 2. Gesamtschaltung des vollständigen Funktionsgenerators

Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß am oberen Frequenzbereichsende eine Spannung von  $-3,8\text{ V}$ , am unteren von  $+3,8\text{ V}$  zur Verfügung steht. Bei manchen Oszillografen ist es daher möglich, daß – entgegen der üblichen Darstellungsweise – die hohen Frequenzen am linken Ende der X-Achse erscheinen. Dies ist jedoch leicht durch Zwischenschaltung eines Inverters – ähnlich IS 2 – zwischen R 46 und Anschluß 10 von IS 3 zu beheben.

### 1.2.2 Wellenformerzeugung

Der Wellenformgenerator der IS 1 ist als eine modifizierte Version eines emittergekoppelten astabilen Multivibrators aufgebaut. Dieser besitzt drei Ausgänge: An den Klemmen 14 und 15 stehen zwei um  $180^\circ$  phasenverschobene Sägezahnspannungen zur Verfügung, die Klemme 12 stellt den Rechteck-Spannungsausgang dar. Bildet man die Differenz der beiden Sägezahnspannungen, dann erhält man einen dreieckförmigen Spannungsverlauf. Dreieck- und Sinusspannungen werden durch direkte Ankopplung der Sägezahnspannungen an die Eingänge 5 und 6 von IS 1

#### Stückliste zur Gesamtschaltung nach Bild 2

Widerstände und Kondensatoren			
R 1 1 M $\Omega$	R 23 50 k $\Omega$ lin	R 45 1 k $\Omega$ lin	C 3 0,15 $\mu\text{F}$
R 2 22 k $\Omega$	R 24 5 k $\Omega$ lin	R 46 10 k $\Omega$	C 4 0,15 $\mu\text{F}$
R 3 22 k $\Omega$	R 25 100 k $\Omega$ lin	R 47 10 k $\Omega$ lin	C 5 470 $\mu\text{F}$
R 4 1 k $\Omega$	R 26 470 k $\Omega$	R 48 50 k $\Omega$ lin	C 6 50 $\mu\text{F}$
R 5 33 k $\Omega$	R 27 1,2 k $\Omega$	R 49 2 k $\Omega$	C 7 8 $\mu\text{F}/$ 250 V =
R 6 22 k $\Omega$	R 28 100 k $\Omega$	R 50 1,8 k $\Omega$	C 8 8 $\mu\text{F}/$ 250 V =
R 7 10 k $\Omega$	R 29 100 k $\Omega$	R 51 40 $\Omega$	C 9 0,1 $\mu\text{F}$
R 8 47 k $\Omega$	R 30 47 k $\Omega$ lin	R 52 7,5 k $\Omega$	C 10 125 $\mu\text{F}$
R 9 4,7 k $\Omega$	R 31 2,2 k $\Omega$	R 53 1,8 k $\Omega$	C 11 12,5 $\mu\text{F}$
R 10 4,7 k $\Omega$	R 32 100 k $\Omega$ lin	R 54 68 k $\Omega$	C 12 1,565 $\mu\text{F}$
R 11 12 $\Omega$	R 33 100 k $\Omega$ lin	R 55 100 $\Omega$	C 13 0,151 $\mu\text{F}$
R 12 12 $\Omega$	R 34 470 k $\Omega$	R 56 10 k $\Omega$	C 14 15,05 nF
R 13 10 $\Omega$	R 35 1,2 k $\Omega$	R 57 1,8 k $\Omega$	C 15 1390 $\mu\text{F}$
R 14 10 k $\Omega$	R 36 200 k $\Omega$	R 58 10 k $\Omega$ lin	C 16 1800 pF
R 15 1,5 k $\Omega$	R 37 200 k $\Omega$	R 59 868 $\Omega/1\%$	C 17 150 pF
R 16 47 k $\Omega$	R 38 100 k $\Omega$	R 60 1020 $\Omega/1\%$	C 18 1800 pF
R 17 47 k $\Omega$	R 39 500 $\Omega$ lin	R 61 10,14 k $\Omega/$ 1%	C 19 150 pF
R 18 330 $\Omega$	R 40 250 k $\Omega$ lin	R 62 10 k $\Omega$	C 20 10 nF
R 19 250 k $\Omega$ lin	R 41 100 k $\Omega$ lin	R 63 100 k $\Omega$ lin	C 21 1,515 $\mu\text{F}/$ 1%
R 20 5 k $\Omega$ lin	R 42 2,5 k $\Omega$ lin		C 22 16,15 nF/ 1%
5 k $\Omega$ lin	R 43 2,5 k $\Omega$ lin	C 1 32 $\mu\text{F}$	C 23 15 pF
R 22 470 $\Omega$	R 44 100 $\Omega$ lin	C 2 5 $\mu\text{F}$	

Belastbarkeit der Festwiderstände: 0,33 bis 0,25 W

Toleranz der Festwiderstände:  $\pm 10\%$ , wenn nicht anders vermerkt

Spannungsfestigkeit der Kondensatoren: 25/30 V =, wenn nicht anders vermerkt

Toleranz der Kondensatoren: handelsübliche Werte; C 21 und C 22 sind auf die angegebenen Werte abzugleichen; C 11 bis C 15 stellen Richtwerte dar und sind individuell abzugleichen.

#### Halbleiter und Spezialteile

Transistoren: T 1, T 2, T 3, T 4 = BC 108 o. ä.

Dioden: D 1 = ZD 20; D 2, D 3, D 4, D 5, D 6, D 7 = 1 N 914

Integrierte Schaltungen: IS 1 = XR 205 (Hersteller: Exar Integrated Systems, Inc., USA; Vertrieb: Gonda Elektronik GmbH)

IS 2, IS 3 = SN 72709 N o. ä.

IS 4 = SN 72741 N o. ä.

Schalter: S 1 = 5 Tasten zu je  $4 \times \text{Um}$ , gegenseitige Auslösung; S 2, S 6 = Stufenschalter  $2 \times 6$ ; S 3, S 4, S 5 = Umschalter  $1 \times \text{Um}$

Zur Demonstration des Frequenzspektrums: Keramisches Zf-Bandfilter für  $455 \pm 2\text{ kHz}$ , z. B. Typ PCF 5/2/455 (Vertrieb: Conrad)

erzeugt, da beide Sägezahnspannungen gleiches Gleichspannungspotential besitzen. Die übrigen Wellenformen müssen kapazitiv angekoppelt werden. Die Rechteck-, Puls- und Sägezahnspannungen gelangen nun über C 2 und C 3 an den Eingang 6. Der Kopplungskondensator C 2 stellt einen Kompromiß dar: Da einer mit großer Kapazität bei niedrigen Frequenzen eine sehr kleine Dachschräge liefert, bei hohen Frequenzen dagegen eine relativ lange Einschwingzeit bei Frequenzänderungen verursacht, verwendet man einen Kondensator mit relativ kleiner Kapazität (C 2) in den hohen Frequenzbereichen und schaltet durch den Schalter S 2b im Bereich „x 1“ einen großen Wert C 6 parallel.

### 1.2.3 Der Modulator bzw. Multiplikator

Die Ausgangsspannungen an den Klemmen 1 und 2 ergeben sich als das Produkt der Spannungen am X- und Y-Eingang des Multiplikators: Die vom internen Differenzverstärker gelieferte Wellenform wird mit der Spannungsdifferenz an den Klemmen 3 und 4 (X-Eingang) multipliziert. Liegt an Anschluß 3 Nullpotential, dann läßt sich die Ausgangsamplitude durch R 24 (Bild 2) von Null bis zum Maximalwert einstellen. Liegt andererseits Anschluß 4 an Nullpotential, so ist die Ausgangsamplitude proportional der vom Modulationsverstärker IS 3 gelieferten Spannung. Der Verstärker selbst ist durch R 28 und R 29 als Inverter geschaltet, R 30 dient der Anpassung der vom Multiplikator benötigten Eingangsspannung an die maximale Modulationsspannung von  $+2\text{ V}$ . Analog zu IS 3 dient auch hier R 25 und R 26 zum Abgleich der Offsetspannung, R 27, C 16 und C 17 zur Wahl des Frequenzganges und R 32 zur Einstellung des Modulationsgrades. Die Dioden D 2 und D 3 schützen die IS vor zu hohen Eingangsspannungen.

### 1.2.4 Der Ausgangsverstärker

Er ist als Darlingtonverstärker aufgebaut und liefert einen für die meisten Anwendungsfälle ausreichenden Strom. Um den Gleichspannungspegel der Ausgangsspannung verändern zu können (Offsetspannung), wird eine durch R 23 veränderliche Gleichspannung an den Eingang des Verstärkers gelegt und die Ausgangsspannung des Multiplikators über die Kondensatoren C 4 und C 5 angekoppelt. Der Ausgang des Verstärkers (Klemme 11) liegt über dem Widerstand R 11 an einer aus der Z-Diode D 1 und dem Widerstand R 12 bestehende Schutzschaltung (Bild 2):

- Wird der Ausgang kurzgeschlossen, so begrenzen die Widerstände R 11 und R 12 den Ausgangsstrom auf einen zulässigen Wert.
- Wird (irrtümlicherweise) eine Spannung größer als  $+10\text{ V}$  an die Ausgangsbuchse gelegt, so beginnt die Z-Diode zu leiten und begrenzt über den Vorwiderstand R 12 die Spannung am Ausgang des Verstärkers auf  $+10\text{ V}$ .
- Bei einer Spannung kleiner als  $-10\text{ V}$  an der Ausgangsbuchse ist D 1 über R 12 in Durchlaßrichtung gepolt und begrenzt die Spannung am Verstärkerausgang auf  $-10\text{ V}$ . Über den Schalter S 5 kann die Ausgangsspannung wahlweise gleich- oder wechsellspannungsgespeist entnommen werden. Für Synchronisierungszwecke steht an Anschluß 12 von IS 1 eine von der Ausgangsamplitude unabhängige Spannung zur Verfügung.

### 1.2.5 Der Sägezahngenerator

Der Sägezahngenerator in Bild 2 unten links ist funktionell unabhängig von dem beschriebenen Funktionsgenerator. Er erzeugt eine von  $0...+2\text{ V}$  und eine von  $-2...+2\text{ V}$  laufende Sägezahnspannung zur internen Amplituden- und/oder Frequenzmodulation.

Die besten Ergebnisse liefert ein aus der Analogrechen-technik bekannter Integrator [1]. Der Integrationskonden- sator C 21 bzw. C 22 ist durch S 6a, die Integrationsspan- nung in Stufen mittels S 6b und kontinuierlich mit R 63 einstellbar. Ein Potentiometer zum Abgleich der Offset- spannung des Verstärkers IS 4 ist nicht notwendig, wenn dafür eine Möglichkeit besteht, die Integrationsspannung auch aus positiven Werten zu wählen, was durch R 49 in Verbindung mit D 6 möglich ist.

## 1.2.6 Das Netzteil

Das Netzteil soll stabilisierte Spannungen von  $-10\text{ V}/70\text{ mA}$  und  $+10\text{ V}/80\text{ mA}$  liefern. Überlagerte Störspannungen sollen in jedem Fall kleiner als  $U_{\text{eff}} = 1\text{ mV}$  sein, da wegen der vorhandenen Modulationsmöglichkeiten Brumm- spannungen einen unmittelbaren Einfluß auf Amplitude und Frequenz des Ausgangssignals haben.

## 2 Kontrolle und Abgleich

Zu Beginn sei ganz allgemein bemerkt, daß die Genauig- keit eines Meßgeräts und insbesondere die des vorliegen- den Funktionsgenerators (Bild 3) ganz erheblich von der Sorgfalt abhängt, die auf seinen Abgleich verwendet wird.

Zunächst sind sämtliche Trimpotentiometer in Mittel- stellung zu bringen. Die Potentiometer R 32 (Modulations- grad) und R 41 (Frequenzhub) sind auf „0“, R 44 (Frequenz fein) ist auf „cal.“ zu stellen. Die Offsetspannung wird durch R 23 auf 0 V, die Ausgangsamplitude durch R 24 auf ihren Maximalwert und S 6 in Stellung „aus“ gebracht. Der Abgleich wird zweckmäßigerweise in folgenden Schritten durchgeführt:

1. Abgriff von R 45 an Masse legen und R 33 so einstellen, daß am „Frequenzanalogen Ausgang“ genau 0 V liegt.
2. Masseverbindung von Abgriff von R 45 entfernen und R 42 und R 43 solange verändern, bis durch R 45 (Fre- quenz grob) am „Frequenzanalogen Ausgang“ eine Span- nung zwischen  $-3,8\text{ V}$  und  $+3,8\text{ V}$  eingestellt werden kann.
3. Für C 12 einen Kondensator von etwa  $1,5\text{ }\mu\text{F}$  einlöten, R 45 in Mittelstellung und S 2 in Stellung „ $\times 100$ “ brin- gen und bei Wellenform „Rechteck“ mittels R 19 die Symmetrie der Rechteckschwingung einstellen.
4. Umschalten auf Wellenform „Dreieck“ und mit R 21 die größte unverzerrte Dreieckspannung einstellen. Hierauf ist ihre Amplitude durch R 21 um etwa 5 % zu ver- ringern.
5. Umschalten auf Wellenform „Sinus“ und mit R 20 auf geringsten Klirrfaktor abgleichen. Durch Verändern von R 45 kann dieser innerhalb eines Frequenzbereiches überprüft werden. (Sollte nun R 21 wieder verändert werden, so ist auch R 20 neu abzugleichen.)
6. S 3 auf „ext.“, R 32 auf „100“, R 24 auf „0“ stellen sowie  $+2\text{ V}$  an den AM-Eingang legen. Nun ist R 30 so ein- zustellen, daß die Ausgangsamplitude 2 V (Spitze- spitze) wird.
7. R 32 auf „0“ stellen und R 25 so lange verändern, bis die Amplitude der Ausgangsspannung minimal ist.
8. S 4 auf „ext.“,  $+2\text{ V}$  an den FM-Eingang legen und R 41 auf „5“ stellen. Abgriff von R 45 an Masse legen und R 40 so einstellen, daß am „Frequenzanalogen Ausgang“  $-3,8\text{ V}$  erscheint.
9. Masseverbindung von Abgriff von R 45 entfernen, R 41 auf „0“ stellen und R 39 so abgleichen, daß sich die Aus- gangsfrequenz beim Durchstimmen von R 45 im Verhält- nis 1 : 10 ändert.

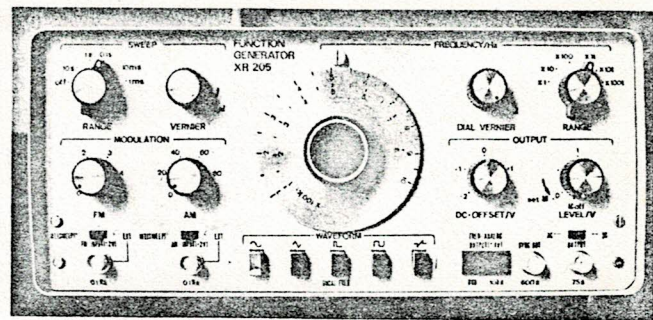


Bild 3. Ansicht des ausgeführten Funktionsgenerators

10. Für die Kondensatoren C 10 bis C 15 sind Richtwerte angegeben, d. h. zur genauen Einstellung der Anfangs- bzw. Endfrequenzen der einzelnen Bereiche sind diese Kondensatoren durch Parallelschalten kleinerer Werte individuell abzugleichen. Wegen der Verwendung eines handelsüblichen Kohleschichtpotentiometers großer Toleranz ist es nicht sinnvoll, einen genauen Skalen- verlauf für R 45 anzugeben. Bei hohen Ansprüchen an die Genauigkeit der Frequenzskala wird daher empfo- len, diese individuell zu eichen. Im Bereich „ $\times 100\ 000$ “ beträgt die erreichbare Frequenzvariation etwa 1 : 9, weshalb hierfür eine eigene Skaleneinteilung (100 kHz bis 800 kHz) empfohlen wird.

Damit ist der Abgleich des Funktionsgenerators und der Modulationsverstärker abgeschlossen. Im folgenden wird nun noch die Einstellung des Sägezahngenerators ange- geben:

11. S 6 wird in Stellung „0,1 s“ und R 63 in Stellung „cal.“ gebracht. Oszillografen an Anschluß 10 von IS 4 an- schließen und R 48 so einstellen, daß eine Sägezahn- schwingung von 0,1 s Periodendauer (bei etwa 5 bis 6 V Amplitude) entsteht.
12. R 47 und R 48 so justieren, daß an den entsprechenden Ausgangsbuchsen ein Sägezahn von  $0/+2\text{ V}$  bzw.  $-2\text{ V}/+2\text{ V}$  zur Verfügung steht.

## 3 Technische Daten

### 3.1 Funktionsgenerator

Frequenzbereich: 1 Hz bis 100 kHz in 5 dekadischen Be- reichen, 100 kHz bis 800 kHz in einem Bereich.

Wellenformen: Sinus: max.  $U_{\text{SS}} = 2,25\text{ V}$ , Klirrfaktor  $< 3\%$ ; Dreieck: max.  $U_{\text{SS}} = 2\text{ V}$ , Nichtlinearität  $< 1\%$ ; Rechteck: max.  $U_{\text{SS}} = 2,25\text{ V}$ , Anstiegs- bzw. Abfallzeit  $\leq 150\text{ ns}$ ; Puls: max.  $U_{\text{SS}} = 2,25\text{ V}$ , Tastverhältnis etwa 5 : 1, ungeeichte Skala; Sägezahn: max.  $U_{\text{SS}} = 2\text{ V}$ , Nichtlinearität  $< 1\%$  für  $f > 10\text{ Hz}$ .

Frequenzgang:  $\pm 0,25\text{ dB}$  zwischen 1 Hz und 800 kHz für Sinusform.

Ausgangswiderstand:  $< 75\text{ }\Omega$ , kurzschlußfest.

Synchronisierausgang: max.  $U_{\text{SS}} = 0,7\text{ V}$ ,  $R_i < 1\text{ k}\Omega$ , kurz- schlußfest.

### 3.2 Amplitudenmodulation

a) intern durch Sägezahnspannung: Periodendauerbe- reich von 10 s...1 ms in fünf dekadischen Bereichen und kontinuierlich; Modulationsgrad: 0...100 %.

b) extern durch beliebige Spannung an Buchse „AM- Eingang“. Frequenzbereich: 0...120 kHz; Modulations- grad: 0...100 %; Eingangsspannungsbereich: 0... $+2\text{ V}$  ent- sprechend 0...100 % der Ausgangsamplitude; maximale Eingangsspannung:  $\pm 500\text{ V}$  kurzzeitig,  $\pm 170\text{ V}$  dauernd; Eingangswiderstand:  $\geq 50\text{ k}\Omega$ .

arität:  $< 0,2\%$ ; Ausgang 1:  $0 \dots +2 \text{ V}$ ,  $R_i = 2,4 \text{ k}\Omega$ , kurzschlußfest; Ausgang 2:  $-2 \text{ V} \dots +2 \text{ V}$ ,  $R_i = 1,2 \text{ k}\Omega$ , kurzschlußfest.

## 4 Anwendungsbeispiele

Neben der Verwendung der fünf Grundwellenformen (Bild 4a-e) als Testfunktionen in der Systemtheorie wird im folgenden hauptsächlich auf die Möglichkeiten der Amplituden- und Frequenzmodulation eingegangen.

### 4.1 Amplitudenmodulation

Da zur Amplitudenmodulation ein Vierquadranten-Multiplikator verwendet wird, ist es je nach Stellung der Potentiometer für „Amplitude“ und „Modulationsgrad“ möglich, für die gleiche, sägezahnförmige Modulationsspannung eine anwachsende (Bild 4f) oder abfallende (Bild 4g) Ausgangsamplitude zu erhalten. Bei sinusförmiger Modulation und  $m = 100\%$  ergibt sich ein Oszillogramm nach Bild 4h bzw. bei unterdrücktem Träger nach Bild 4i. Auch sehr selten vorkommende Kombinationen aus Träger- und Modulationsspannung lassen sich einfach und vor allem anschaulich demonstrieren: So zeigt z. B. Bild 4j eine sinusförmig modulierte Pulsspannung, Bild 4k eine dreieckförmige Trägerspannung, deren Frequenz kleiner ist als die der sinusförmigen Modulationsspannung und Bild 4l einen sägezahnförmigen Träger, dessen Frequenz kleiner ist als die der sinusförmigen Modulationsspannung. Geht man davon aus, daß Träger- und Modulationsspannungen alle fünf Wellenformen annehmen können, und unterscheidet man zwischen  $f_T \leq f_M$ , so sind 50 verschiedene amplitudenmodulierte Wellenformen möglich. In diesen sind auch die für die Nachrichtentechnik bedeutsamen Modulationsarten wie AM mit Träger, AM mit unterdrücktem Träger und PAM enthalten.

Eine weitere Anwendung ergibt sich bei der Untersuchung der nichtlinearen Verzerrungen in Übertragungssystemen. So kann z. B. bei der Beurteilung der Aussteuerbarkeit eines Verstärkers die zur internen Amplitudenmodulation verwendete Sägezahnspannung an den Horizontaleingang und die nach Bild 4f verstärkte Ausgangsspannung an den Vertikaleingang eines Oszillografen gelegt werden. Auf diese Weise läßt sich unmittelbar die Grenze der linearen Aussteuerbarkeit des Verstärkers erkennen.

### 4.2 Frequenzmodulation

Bild 4m zeigt eine durch eine Sägezahnspannung (Sweep) frequenzmodulierte Sinusspannung. Technisch bedeutsame Anwendungsfälle stellen die in Bild 4n gezeigte Frequenzumtastung (Zweitentelegrafie, FSK) und die in Bild 4o dargestellte Phasenumtastung (PSK) dar. Ähnlich wie bei der Amplitudenmodulation lassen sich auch hier aus der Vielzahl der vorhandenen Möglichkeiten die wesentlichsten Modulationsarten wie FM, PM, PFM, PPM anschaulich demonstrieren.

### 4.3 Komplexe Modulationsarten

Hierunter fallen alle Trägerfrequenzen, die auf mehrere Arten gleichzeitig moduliert werden. Im folgenden sind einige unter Umständen technisch bedeutsame ausgewählt: So zeigt z. B. Bild 4p eine sägezahnförmig amplituden- und frequenzmodulierte Sinusspannung, deren Trägerfrequenz zudem noch unterdrückt ist. Bild 4q gibt den Verlauf eines ebenfalls in Amplitude und Frequenz modulierten Trägers wieder. Gleichzeitige Amplituden- und Frequenzmodulation eines sinusförmigen Trägers mit einer Rechteckspannung ist in Bild 4r dargestellt. Moduliert man die Amplitude eines sinusförmigen Trägers mit einer Sinusspannung und die Frequenz dieses Trägers mit einer Sägezahnspannung, so erhält man ein Ausgangssignal nach Bild 4s. In

Bild 4t wurde ein sinusförmiger Träger ( $\hat{u}_T$ ) sägezahnförmig frequenz- und sinusförmig amplitudenmoduliert, wobei die Trägerfrequenz sehr viel kleiner als die Modulationsfrequenz ( $\hat{u}_M$ ) und  $\hat{u}_M = 0,5 \cdot \hat{u}_T$  gewählt wurde. Bild 4u schließlich zeigt ein analoges Beispiel, jedoch bei rechteckförmiger Trägerspannung.

### 4.4 Amplitudengangmessungen

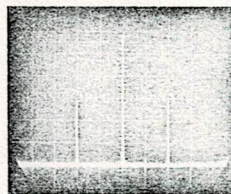
Legt man eine frequenzmodulierte, sinusförmige Spannung nach Bild 4m an den Eingang eines Vierpols, so erhält man am Ausgang einen Spannungsverlauf ähnlich Bild 7v, dessen Hüllkurve den Amplitudengang des untersuchten Vierpols wiedergibt. Zur Vertikalablenkung wird der Oszillograf direkt bzw. bei höheren Frequenzen über einen Demodulatorastkopf an den Ausgang des Vierpols angeschlossen. Die Horizontalablenkung kann entweder durch den „frequenzanalogen Ausgang“ oder den  $\pm 2\text{-V}$ -Sägezahn erfolgen. Im ersten Fall ist die Ablenkung proportional der Anzeige der Frequenzskala und dem gewählten Frequenzhub. Bei kleinem Hub läßt sich daher durch Verändern der Mittenfrequenz der gesamte Frequenzbereich abschnittsweise untersuchen. Im zweiten Fall ist die Ablenkung konstant  $\pm 2 \text{ V}$  und entspricht in ihrer vollen Länge dem ausgewählten Frequenzhub.

Wird die Wobbelgeschwindigkeit zu groß, so deformiert sich die Durchlaßkurve (Bild 4v). Für derartige Fälle hat sich die folgende Näherung [2] in der Praxis bewährt:

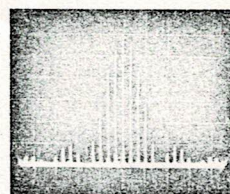
$$f_w = \frac{(f_B)^2}{20 \cdot f_H} \quad (2)$$

Hierin bedeuten:  $f_w$  = maximal zulässige Wobbelfrequenz,  $f_B$  = Halbwertbreite des untersuchten Resonanzkreises und  $f_H$  = Frequenzhub.

Bild 4x zeigt den Amplitudengang eines Hochpasses. Ein Beispiel für eine demodulierte Durchlaßkurve ist in Bild 4y dargestellt: Bei einem Frequenzhub von  $\pm 350 \text{ kHz}$  ist die Selektionskurve eines auf  $520 \text{ kHz}$  abgestimmten Mittelwellenempfängers dargestellt. Verringert man den Frequenzhub auf  $\pm 50 \text{ kHz}$ , so erhält man eine gedehnte Darstellung nach Bild 4z.



◀ Bild 5. Spektrum bei sinusförmiger AM



▶ Bild 6. Spektrum bei pulsformiger AM

### 4.5 Darstellung von Frequenzspektren

Wobbelt man den Bereich von  $100 \text{ kHz}$  bis  $800 \text{ kHz}$  und wählt durch ein geeignetes Bandfilter (z. B. keram. Zf-Filter  $455 \pm 2 \text{ kHz}$ ) einen schmalen Frequenzbereich aus, so erscheint bei anschließender Demodulation und frequenzanaloger X-Ablenkung die Durchlaßkurve dieses Schmalbandfilters auf dem Oszillografenschirm. Durch zusätzliche externe Amplitudenmodulation können demnach die spektralen Anteile des modulierten Trägers anschaulich dargestellt werden: So zeigt z. B. Bild 5 das Spektrum eines zu  $100\%$  sinusförmig amplitudenmodulierten Trägers ähnlich Bild 4h, während Bild 6 das eines pulsförmig (Periodendauer  $35 \mu\text{s}$ , Tastverhältnis 5) modulierten Trägers wiedergibt [3].

Ein ähnliches Gerät bzw. den entsprechenden Bausatz liefert die Firma Schwiller Electronics.

### Literatur

- [1] Elektronik-Arbeitsblatt Nr. 6: Anwendung von Rechenverstärkern. ELEKTRONIK 1966, H. 7, hinter S. 230.
- [2] Czech, J.: Oszillografen-Meßtechnik. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin.
- [3] Telefunken-Laborbuch, Band 1, S. 31 ff., Franzis-Verlag, München.