

Quarzoszillatoren (1)

HERRMANN SCHREIBER

Wenn man versucht, sie zu überschauen, die Bataillone der weltweit veröffentlichten Schaltungen für Quarzoszillatoren, dann hat man den Eindruck, es wäre da wie bei den Krawatten: Jeder hätte gern etwas Persönliches. Nach eingehender, besonders praktischer Beschäftigung mit dem Thema muß man aber feststellen, daß dieser Krawattenvergleich nur zum Teil stimmt. Es gibt eine ganze Reihe von Feinheiten, wie Frequenzkonstanz, Amplitude und Form der Ausgangsspannung, Ziehfähigkeit, Stromverbrauch, Anpassung, bei deren Kenntnis man mit weniger Aufwand weiterkommt.

Die Grundschaltungen unterscheiden sich durch Serien- oder Parallelresonanz. Die erste Betriebsart gilt als problemlos und zeichnet sich durch einen großen Ziehbereich aus, der sich auch unter die Serienresonanz erstrecken kann.

Die zweite verlangt weniger Aufwand, aber die Bauteilwerte müssen oft an die jeweilige Frequenz angepaßt werden. Die Unterschiede sind jedoch gering, alle als Parallelresonanz gehandelten Quarze lassen sich auch in einem Oszillator für Serienresonanz auf ihre Nennfrequenz ziehen, und umgekehrt gibt es nur wenige Serienquarze, die in einem Paralleloszillator nur mit einer Korrekturspule die Nennfrequenz liefern.

Erst messen

Bedeutung und Frequenzwerte der beiden Resonanzen eines Quarzes kann man mit einfachen Mitteln darstellen und messen. In Bild 1 wird das Meßobjekt Q zwischen zwei Punkten niedriger Impedanz (etwa 20 Ω) aufgehängt. Wenn man die Frequenz des Meßsenders langsam erhöht, stellt man zunächst, etwas unterhalb der Nennfrequenz des Quarzes, ein scharfes Maximum der Ausgangsspannung (Kollektor T₂) fest. Auf der entsprechenden Frequenz ist die Impedanz des Quarzes minimal. Es handelt sich also um die Serienresonanz.

Bei weiterer Erhöhung der Frequenz beobachtet man ein scharfes Minimum. Dort sind höchstens noch Oberwellen des Meßsenders auf dem ausgangsseitig angeschlossenen Oszilloskop zu sehen. Auf der Grundwelle verhält sich der Quarz wie ein

sehr hoher Widerstand, gleichbedeutend mit Parallelresonanz. Auf dem darüberliegenden Frequenzgebiet kann man oft Nebenresonanzen des Quarzes feststellen. Für Oszillatoren sind sie bedeutungslos, auch bei Filteranwendungen stören sie nur sehr selten.

Messungen an einem 9-MHz-Quarz ergaben 8997,15 kHz für die Serien- und 9016,8 kHz für die Parallelresonanz. Der erstgenannte Wert wurde auch mit der traditionellen Methode des Wegstimmens der Parallelkapazität durch einen LC-Kreis erhalten.

Serienresonanz: Vom Meßkreis zum Oszillator

Um Schwingungen zu erregen, genügt es, den Meßsender (Bild 1) abzutrennen und dafür C₁ an Kollektor T₂ zu führen. Geschlossen wird der Mitkopplungsweg dabei nur durch die Serienresonanz des Quarzes.

Also Schwingungen auf 8997,15 kHz, wie oben stolz bestimmt? Nein, es sind etwa 3 kHz weniger, weil der Oszillator zu energisch an die Sache herangeht. Amplitudenbegrenzung durch Übersteuerung. Das ist wie bei einem Pendel, dessen Schwingweite man durch eine mit Fliegenleim bestrichene Fläche begrenzt. Dort bleibt es bei jeder Schwingung einen Augenblick kleben, und das zähflüssige Loslösen verringert die Schwingfrequenz.

Bild 2 zeigt, wie korrekter Betrieb auf Serienresonanz möglich ist. Dazu stellt man R₅ so ein, daß der Oszillator gerade sicher schwingt. Am neu eingeführten Lastwiderstand R₃ erhält man dann eine gut sinusförmige Ausgangsspannung von etwa 0,5 V_{eff}, und die Frequenz entspricht tatsächlich der oben bestimmten Serienresonanz.

Man kann also letztere durchaus mit der sehr einfachen Methode der Oszillatorfrequenz bestimmen, wenn man Übersteuerung vermeidet. Eine Veränderung der Betriebsspannung von 12 auf 6 V ergibt eine Verstimmlung von etwa 150 Hz (17 × 10⁻⁶), bei Verringerung der Amplitude auf weniger als die Hälfte.

Die Nennfrequenz des Quarzes erhält man mit einem in Reihe gelegten Ziehkondensator (5...50 pF), den man entsprechend ab-

Tabelle 1: Ziehbreiten handelsüblicher Quarze

f _{nom} (MHz)	Ziehbreite (kHz)	(%)
2	-0,55/+1,94	0,125
4	-1,05/+3,95	0,125
9	-2,85/+13,1	0,178
15	-5,23/+19,1	0,162
24	-4,4/+8,6	0,054

Tabelle 2: Ziehbreiten mit BB 329 B

f _{nom} (MHz)	Ziehbreite mit Kapazitätsdiode (kHz)	(%)
2	-0,23/+1,09	0,066
4	-0,59/+2,15	0,069
9	-1,31/+8,32	0,107
15	-2,76/+12,5	0,102
24	-2,57/+5,26	0,033

Tabelle 3: Ziehbreiten bei Parallelresonanz

f _{nom} (MHz)	C _e (pF)	Ziehbreite mit Kapazitätsdiode (kHz)	(%)
2	1000	-0,17/+0,55	0,036
4	1000	-0,53/+1,03	0,039
9	1000	-0,86/+5,21	0,067
15	470	-1,75/+7,38	0,061
24	100	-0,29/+3,61	0,016

Tabelle 4: Ziehbreiten mit CMOS-Inverter

f _{nom} (MHz)	C _i (pF)	Ziehbreite mit Kapazitätsdiode (0...15 V) (kHz)	(%)
2	1000	-0,25/+0,24	0,025
4	1000	-0,63/+0,43	0,027
9	1000	-1,32/+3,41	0,053
15	330	-2,1/+4,2	0,042
24	47	-0,1/+3,9	0,017

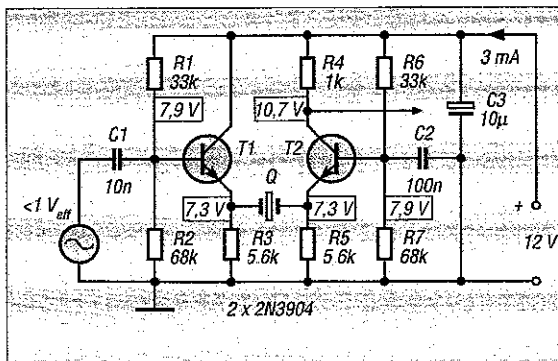
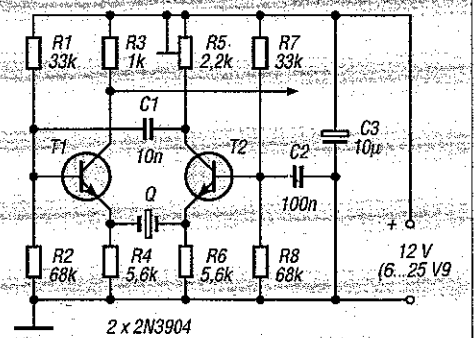


Bild 1: Zur Messung seiner Serien- und Parallelresonanzfrequenz wird der Quarz zwischen einem niederohmigen Signalausgang und einem ebenso niederohmigen Eingang geschaltet.

Bild 2: Nur wenige Änderungen sind nötig, um die Meßschaltung in Bild 1 in einen Oszillator für Serienresonanz (bis 25 MHz) zu verwandeln. R₅ gestattet Abgleich auf Schwingungseinsatz.



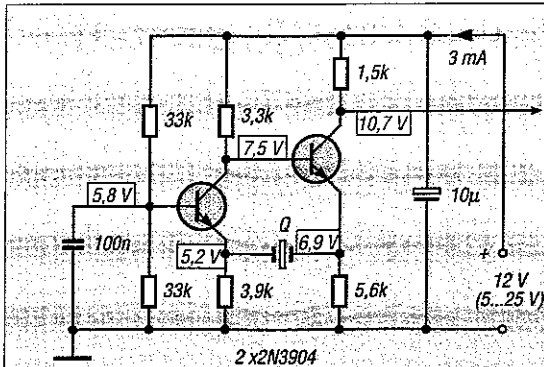
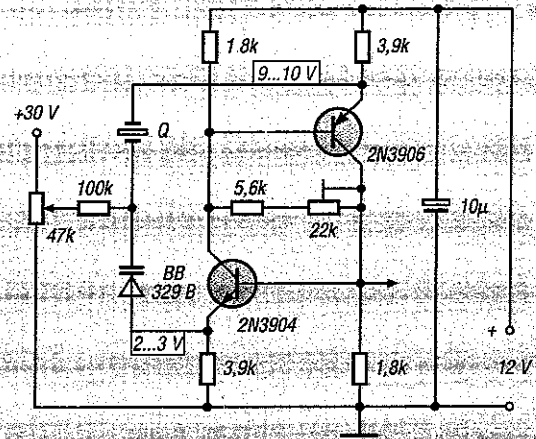


Bild 3: Durch Direktkopplung kann man die Schaltung in Bild 2 etwas vereinfachen, wenn man auf eine Einstellung des Mitkopplungsgrads verzichten kann.

Bild 4: Ein hoher Mitkopplungszwang gestattet es, mit einer Kapazitätsdiode einen Ziehbereich von bis zu 0,2 % der Nominalfrequenz zu überstreichen.



gleich. Auf Grund der Gleichspannungen an den Quarzanschlüssen wäre Ziehen mit Kapazitätsdiode hier umständlich, geeignete Schaltungen folgen.

Tabelle 1 gibt Auskunft über die Ziehbreiten handelsüblicher Quarze. Die erste Spalte enthält die Nennfrequenz (Grundwelle), die zweite die Abweichungen gegenüber dieser Nennfrequenz, die man einerseits bei Serienresonanz erhält, andererseits mit einer Ziehkapazität von 1 pF und nach erneuter Einstellung auf Schwingungseinsatz.

In der dritten Spalte erscheint die relative Ziehbreite. Letztere ist umgekehrt proportional zur Parallelkapazität, die wiederum von der Fläche und der Dicke des Quarzkristalls abhängt. Die Tabelle berücksichtigt nicht die Möglichkeit des Ziehens nach unten, die durch die oben erwähnte Übersteuerung des Oszillators oder durch die später behandelte Korrektur mit Spulen erfolgen kann.

Varianten mit Direktkopplung

Nicht immer wird eine gut sinusförmige Ausgangsspannung gefordert, und die Frequenzgenauigkeit spielt keine große Rolle, wenn man einen Quarz nur einsetzt, um eine Spule zu sparen. Dann geht es auch einfacher, beispielsweise wie in Bild 3.

Mit den Versuchsquarzen von 2 bis 15 MHz konnten Schwingungen erzielt werden, im letzten Falle allerdings mehr als 60 kHz unter der Nominalfrequenz. Auch bei den anderen Quarzen verringerte die Übersteuerung die Minimalfrequenz deutlich gegenüber der vorstehenden Tabelle. Mit einem Ziehkondensator konnte jedoch in allen Fällen die Nominalfrequenz wieder erreicht und überschritten werden.

Die Speisespannung hat einen etwa 15mal höheren Einfluß auf die Frequenz als bei Bild 2. In der Regel kann man annehmen, daß temperaturbedingte Drifterscheinungen in den Transistoren die Frequenz etwa genau so beeinflussen wie die Speisespannung

Wenn letztere in dieser Hinsicht wenig kritisch ist, kann man also erwarten, daß der Oszillator auch anderweit ziemlich drifftfest ist. Die in Bild 3 eingetragenen Gleichspannungen gelten im Ruhezustand (ohne Quarz) und bei Speisung an 12 V.

Gegenüber Spulen haben Quarze den Vorteil, magnetische Störfelder weder abstrahlen noch aufzunehmen. Manchmal möchte man geringe statische Felder, also wenig HF-Spannung im Ausgang. Das kann auch gut sein, um Übersteuerung einer nachfolgenden Stufe zu vermeiden.

Geeignet ist hier der Oszillator in Bild 4. Er liefert knappe 0,1 V_{eff}, wenn man den Basisstrom der beiden Komplementärtransistoren auf sinusförmige Ausgangsspannung einstellt. Die angegebenen Gleichspannungswerte hängen von dieser Einstellung ab.

Die Mitkopplung erfolgt dreifach: durch den Quarz, die Verbindung von Kollektor T₁ zu Basis T₂, und die von Kollektor T₂ zu Basis T₁. Deshalb bedeutet Sinus am Ausgang nicht sinusförmige Erregung des Quarzes, und damit kann letzterer wieder auf deutlich unter seiner Serienresonanz liegende Frequenzen gezwungen werden.

Mit einem 9-MHz-Quarz und der Kapazitätsdiode BB 329 B überstreicht man von -11 bis +7 kHz, also 0,2 % der Nominalfrequenz. Nützlich kann so etwas sein, wenn eine Synchrondemodulation einem der Wanderlust verfallenen Träger nachlaufen soll. Da bei dieser Anwendung ohnehin geregelt wird, können Drifterscheinungen höchstens die Ziehbreite beeinflussen.

Mit 1 pF in Reihe zum Quarz wurde die Schaltung zwischen 2 und 15 MHz erfolgreich getestet. Der 24-MHz-Quarz der Tabelle 1 litt so unter den von der mehrfachen Mitkopplung verfügen Zwangsverfahren, daß es bei direktem Einsatz mehr als 100 kHz unter seinem Nennwert blieb. Mit 3,3 pF in Reihe ließ er sich jedoch mehr als 3 kHz darüber ziehen.

Quarz zwischen Emitter und Masse

Aus dem Verhältnis zwischen Kollektor- und Emitterwiderständen der Transistoren in Bild 1 kann man erkennen, daß die Summe der Spannungsverstärkungen niedriger ist als 1. Die Rückkopplung durch C₁ ergibt deshalb nur einen Oszillator, wenn eine niedrige Impedanz parallel zu R₂ liegt. Schwingen wird er auf der Frequenz, bei der die zugeschaltete Impedanz am nied-

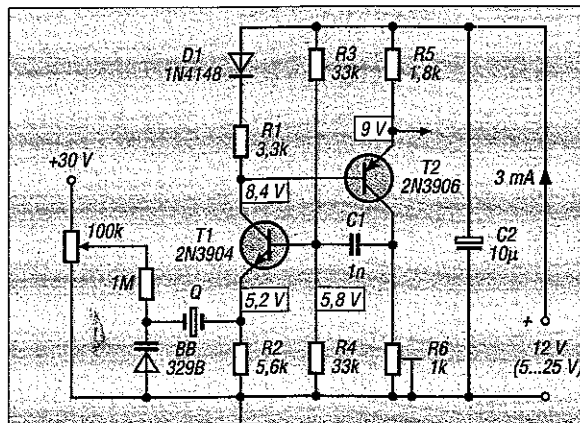


Bild 5: Oszillator für Serienresonanz, bei dem ein Quarzanschluß an Masse liegen kann. Eine Frequenzbeeinflussung durch die Kapazitätsdiode ist hier besonders bequem zu handhaben.

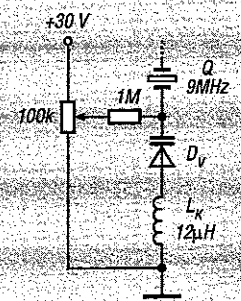


Bild 6: Die Korrekturspule L_k gestattet einen zur Nennfrequenz symmetrischen Ziehbereich.

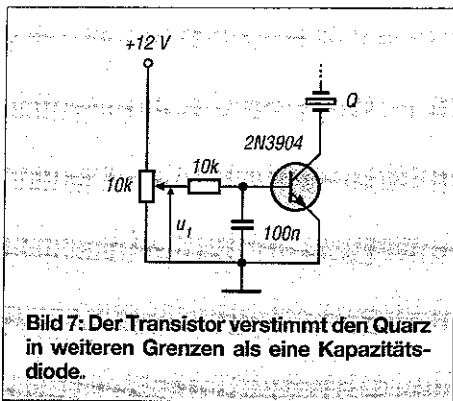


Bild 7: Der Transistor verstimmt den Quarz in weiteren Grenzen als eine Kapazitätsdiode.

rigsten ist, hier also bei Serienresonanz des Quarzes. Da ein Anschluß des Quarzes an Masse liegen kann, ist diese Anordnung ideal für das Nachstimmen mit Kapazitätsdiode.

D_1 dient zum Ausgleich des Temperaturgangs in T_2 . Wie bei den vorigen Beispielen kann man über die Mitkopplung (R_6) eine möglichst geringe Verzerrung im Ausgang einstellen oder den mit der Kapazitätsdiode überstrichenen Frequenzbereich etwas verschieben. Die Amplitude am Quarz bleibt so gering, daß eine Einengung des Nachstimmereiches durch Gleichrichterwirkung der Kapazitätsdiode nicht zu erwarten ist.

Die in der Schaltung angegebenen Spannungswerte gelten für Speisung an 12 V. Die Ausgangsamplitude beträgt dann maximal $4 V_{SS}$. Emittor T_2 liefert einen niederohmigen Ausgang. Die optimale Lastkapazität beträgt etwa 10 pF.

Bis 15 MHz werden Schwingungen schon bei Speisung mit 5 V erhalten, nur bei 24 MHz müssen es 7 V sein. Bei Frequenzen unter 10 MHz kann man mit geringerem Betriebsstrom auskommen, wenn man alle Widerstandswerte in einem gleichen Verhältnis erhöht. Bei Erhöhen der Speisung von 6 auf 12 V wurde auf 9 MHz eine Frequenzdrift von 100 Hz beobachtet.

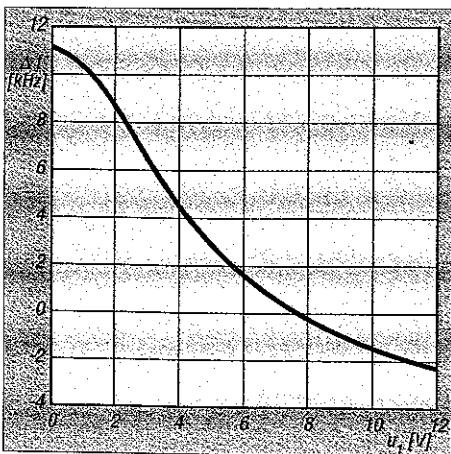


Bild 8: Elektronische Verstimmung nach Bild 7, angewandt im Oszillator nach Bild 5 bei einer Nennfrequenz von 9 MHz.

Für Tabelle 2 dienten wieder die für Tabelle 1 verwendeten Quarze. Da sich jedoch bei beiden Anwendungen (Bilder 2 und 5) die bei direktem Einsatz und 1 pF in Reihe gemessenen Werte weitgehend decken, wurden hier die mit einer Kapazitätsdiode BB 329 B, bei 0 und 30 V erhaltenen Frequenzabweichungen eingetragen. R_6 wurde zwischen den beiden Messungen nicht auf Schwingungseinsatz nachgetrimmt.

Die angegebenen Extremwerte sind immer unsymmetrisch zur Nennfrequenz. Wenn man sich, bei 9 MHz, mit einem symmetrischen Ziehbereich von etwa ± 1 kHz begnügt, reicht eine zwischen 1 und 10 V einstellbare Abstimmungsspannung aus. Versuche mit den Kapazitätsdioden BB 909 und BB 209 ergaben um einige 100 Hz nach oben verschobene Ziehbereiche.

Eine symmetrische Nachstimmung von ± 5 kHz (bei $f_Q = 9$ MHz) erhält man in Bild 6 durch Zuschalten einer Korrekturspule L_K . Als Faustformel zur Berechnung von L_K (in μH) gilt $1000/f_Q^2$ (f_Q in MHz). Höhere Werte von L_K gestatten grundsätzlich Ziehen auf tiefere Frequenzen.

nicht weniger linear ist als bei Kapazitätsdioden. Die Möglichkeit einer zusätzlichen Beeinflussung durch eine Korrekturspule ist hier allerdings begrenzt, da die Frequenz sich dann sprunghaft ändern kann. Anwenden kann man diese Methode der Transistornachstimmung bei weitem nicht bei allen Quarzoszillatoren.

■ Quarz zwischen Source und Masse

Wenn man T_1 von Bild 1 durch einen Feldeffekttransistor ersetzt, erhält man, in Bild 9, eine etwas einfachere Schaltung. Kein Kondensator wird benötigt, da Gate T_1 direkt mit Kollektor T_2 verbunden werden kann. Die angegebenen Spannungswerte gelten für den nichtschwingenden Zustand (ohne Quarz). Sie hängen von der Einstellung der Kollektorspannung I_2 ab und sind auch den Datenstreuungen von T_1 unterworfen.

Bei Beginn der Begrenzung erhält man eine Ausgangsamplitude von $6 V_{SS}$ bei 9 MHz. Die Speisespannung ist jedoch kritischer als vorher. Unterhalb von 9 V setzen auch bei relativ niedrigen Quarzfrequenzen die Schwingungen aus.

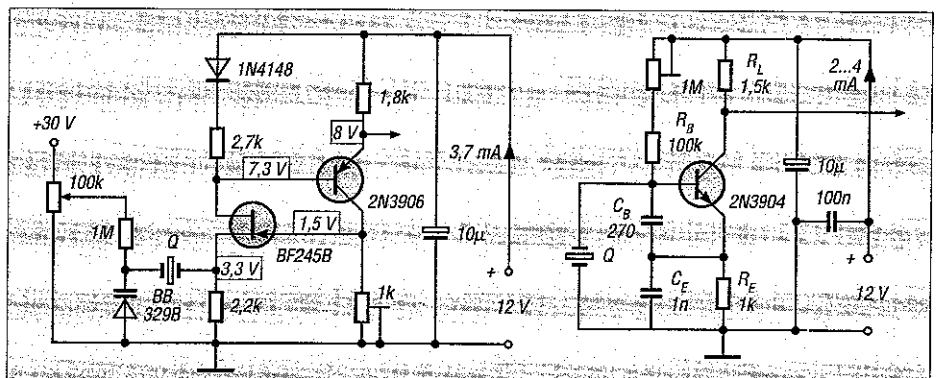


Bild 9: Wenn man T_1 in Bild 5 durch einen Feldeffekttransistor ersetzt, gestattet Direktkopplung einen einfacheren Aufbau des Oszillators. Bild 10: Dieser sehr einfache Paralleloszillator ist bei entsprechender Anpassung von C_E bis mindestens 25 MHz einsetzbar und kann leicht für Speisung an 3 V umdimensioniert werden.

Es ist jedoch leicht möglich, daß der Oszillator nicht mehr den Quarz als frequenzbestimmend betrachtet, sondern die Reihenschaltung von L_K mit der Parallelkapazität des Quarzes und D_V .

Spulengüte ist für L_K weniger wichtig als geringe Eigenkapazität. Also einlagig wickeln, und mit doppelt umsponnenem Draht, ein Drahtdurchmesser von 0,1 mm genügt. Mit einem Wickelkörper von 9 mm Durchmesser ergeben etwa 30 Windungen die erforderlichen $12 \mu H$.

Einen besonders breiten Nachstimmereich bei geringer Nachstimmungsspannung erhält man, nach Bild 7, durch Ersatz der eigentlich für solche Anwendungen vorgesehenen Kapazitätsdiode durch einen nicht dafür vorgesehenen Transistor.

Bild 8 (für $f_Q = 9$ MHz) zeigt einen Zusammenhang zwischen U_1 und Δf , der durchaus

Die oben erwähnten Ziehmethoden sind auch bei Bild 8 anwendbar, zumindest bis 15 MHz. Bei 24 MHz konnten keine Schwingungen erhalten werden.

Bei beiden Schaltungen ist die Einstellung des Trimmwiderstands im Kollektor T_2 keineswegs kritisch. Man kann ihn grundsätzlich nach erfolgtem Abgleich durch einen Festwiderstand ersetzen. Wichtig ist der Betrieb in unmittelbarer Nähe des Schwingungseinsatzes nur, wenn man den genauen Frequenzwert der Serienresonanz ermitteln will, oder die mit einer gegebenen Ziehkapazität erhaltene Frequenz.

■ Parallelresonanz

Der Aufwand ist geringer bei Parallelresonanz, das ersieht man sofort aus Bild 10. Ein Transistor genügt, während es bei Serienresonanz mindestens zwei sein müssen,

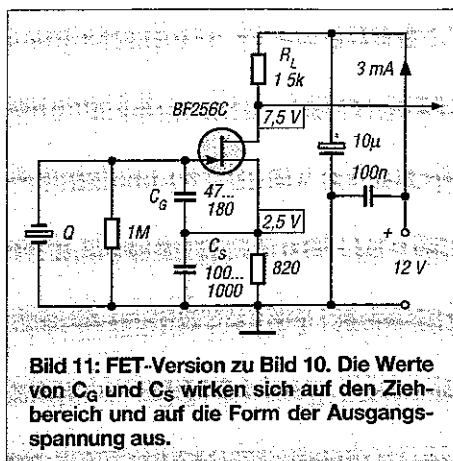


Bild 11: FET-Version zu Bild 10. Die Werte von C_G und C_S wirken sich auf den Ziehbereich und auf die Form der Ausgangsspannung aus.

solange man keine Spulen im Oszillator verwendet.

Ein Quarzanschluß liegt bei Bild 10 an Masse. Ein dort eingeführter Trimmkondensator ist deshalb frei von Handkapazität, und eine Kapazitätsdiode kann man ohne Potentialprobleme ansteuern. Der damit erhaltene Ziehbereich wird um so größer, je höher man die Werte von C_B und C_E wählen kann. Bei zuviel schwingt der Oszillator nicht mehr oder schwingt nicht mehr von allein an, wenn man die Speisespannung anlegt.

Die in Bild 10 angegebenen Werte wurden mit einem 9-MHz-Quarz optimiert. Der Basistrom kann mit R_B auf maximale Amplitude ($7 V_{SS}$ bei 9 MHz und 15 pF Last) oder auf minimale Verzerrung eingestellt werden. Weitere Verbesserung der Signalform ist möglich, wenn man R_E etwa zwischen 0,5 und 5 k Ω einstellbar macht. Bei direktem Einsatz des Quarzes (Serienresonanz 8997,15 kHz) schwingt der Oszillator auf 8897,54 kHz, und diese Frequenz ändert sich nur um 5 Hz, wenn man die Speisespannung von 6 auf 12 V erhöht. Mit 1 pF in Reihe zum Quarz erhält man 9013,18 kHz.

Eine Kapazitätsdiode BB 329 B, mit einer zwischen 0 und 30 V einstellbaren Spannung gesteuert, ergab einen Ziehbereich von -0,86 bis +5,21 kHz. Eine wie in Bild 6 geschaltete Korrekturspule von $L_K = 12 \mu H$ verschob diesen Bereich auf -3,2/+3,5 kHz. Höhere L_K -Werte (bis 40 μH) gestatteten Ziehen bis auf -25 kHz, darunter setzten die

Schwingungen aus. Im Gegensatz zum Serienoszillator ist also hier bei übertriebenen Ziehversuchen ein Weiterschwingen auf einer vom Quarz unabhängigen Frequenz nicht zu fürchten.

Die Frequenz steigt um etwa 4×10^{-6} , wenn man die Lastkapazität von 10 auf 20 pF erhöht. Das Funktionsprinzip des Oszillators ist jedoch unabhängig von der Last. Auch bei kurzgeschlossenem Ausgang bleiben die Schwingungen bestehen.

Bei Frequenzen unter 9 MHz kann die Form der Ausgangsspannung durch Vergrößern von C_B , C_E und R_E verbessert werden. Der Ziehbereich wird dadurch jedoch kaum erweitert.

Bei höheren Frequenzen können Schwingungen nur mit verringerten Werten von C_E erhalten werden. Tabelle 3 gibt darüber Aufschluß. Die dort angegebenen Ziehbreiten wurden mit einer Kapazitätsdiode BB 329 B (Vorspannung 0 und 30 V) gemessen.

Die maximal mögliche Ausgangsamplitude betrug bei Belastung mit etwa 12 pF $10 V_{SS}$ bei 2 kHz und $4 V_{SS}$ auf 24 MHz. Um auch bei Speisung mit 3 V Schwingungen zu erhalten, genügte bis 4 MHz eine Verringerung von R_E auf 470 Ω . Zwischen 5 und 15 MHz mußte außerdem C_E auf 470 pF verringert werden, bei 24 MHz auf 80 pF.

■ FET-Varianten

Der Parallel-Oszillator in Bild 11 ist bis mindestens 15 MHz brauchbar und sein Ziehbereich ist geringer als bei Bild 10. Dafür ändert sich die Frequenz weniger mit der Lastkapazität. Bei geeigneter Wahl von C_G und C_S ist es auch möglich, eine bessere Form der Ausgangsspannung zu erhalten.

Eine besonders hohe Ausgangsamplitude ($8 V_{SS}$ bis 9 MHz, $5 V_{SS}$ bei 15 MHz) erhält man mit dem Differentialverstärker in Bild 12. Andererseits ist auch mit nur 3 V Speisespannung ein Betrieb bis 15 MHz möglich.

Bei 24 MHz muß mit mindestens 9 V gespeist werden und man erhält kaum mehr als 1,5 V_{SS} am Ausgang. Obwohl der Ziehbereich geringer ist als bei den vorausgehenden Beispielen, gelang es, alle Quarze

der Versuchsreihe auf ihre Nominalfrequenz zu ziehen; manchmal etwas knapp vor Abbruch der Schwingungen. Änderungen der Lastkapazität oder der Speisespannung wirken sich auf die Frequenz etwas stärker aus als bei Bild 11. Nachstimmen mit Kapazitätsdiode ist auf Grund zu hoher Amplitude nicht möglich.

Wenn ein relativ geringer Ziehbereich gefordert wird, kann man einen CMOS-Inverter als Oszillator benutzen. In Bild 13 liegt ein derartiger Inverter mit dem Eingang an Pin 11 und dem Ausgang an Pin 10 des Frequenzteilers 74HC4060. Ein nachgeschalteter zweiter Inverter, mit Ausgang an Pin 9, kann als Pufferstufe dienen. Weiterhin verfügt man über die 10 anderen Ausgänge des Teilers.

Die Amplitude am Quarz und damit die Ziehfähigkeit mit Kapazitätsdiode bestimmt der Wert von C_1 . Um Vergleiche zu gestatten, sind die Ziehbreiten nochmals in Tabelle 4, gültig für Speisespannungen zwischen 0 und 15 V, dargestellt.

Dieser Spannungsbereich genügt zur Erreichung eines einigermaßen symmetrischen Ziehbereiches. Eine Ausnahme bildet der 24-MHz-Quarz, der nur bei Ergänzung durch Korrekturspule bequem auf seine Nominalfrequenz zu ziehen sein dürfte.

■ Partialresonanz

Oberhalb von 25 oder 30 MHz werden die Quarzplättchen so dünn, daß ihre Herstellung Schwierigkeiten macht. Man benutzt dann den Oberwellenmodus: Der Quarz schwingt auf einem ungeradzahligem Vielfachen seiner Grundfrequenz.

Natürlich tut er das nur unter Zwang. Dieser wird ausgeübt durch einen auf die erwartete Frequenz abgestimmten LC-Kreis.

Ist mit jedem Quarz ein solcher Oberwellenbetrieb möglich? Als die Techniker von Radio Eriwan das untersuchten, stellten sie fest: Im Prinzip ja. Aber die erhaltene Frequenz ist meist kein ganzzahliges Vielfaches der Serien- oder Parallelresonanz. Oft liegt sie tiefer, manchmal mehr als 1%. Je höher die Frequenz, um so geringer wird im allgemeinen der Unterschied.

(wird fortgesetzt)

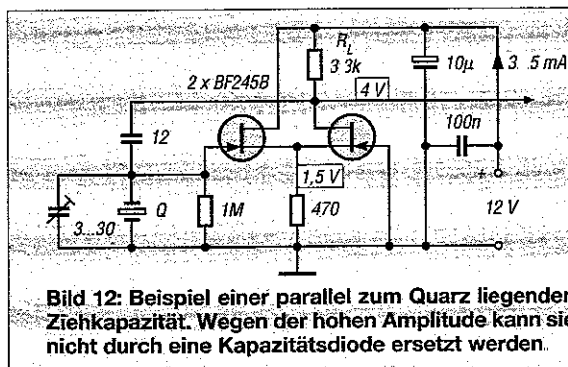
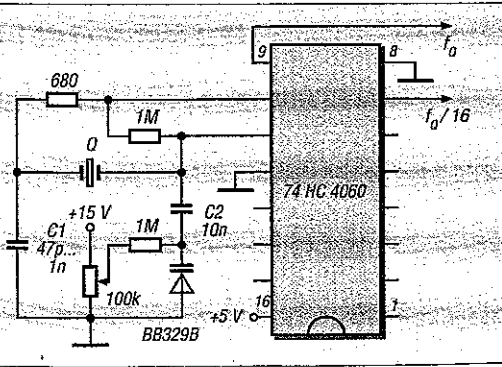


Bild 12: Beispiel einer parallel zum Quarz liegenden Ziehkapazität. Wegen der hohen Amplitude kann sie nicht durch eine Kapazitätsdiode ersetzt werden.

Bild 13: Bis mindestens 25 MHz verwendbarer Quarzoszillator mit CMOS-Inverter. Obwohl geringer als bei manchen Transistorschaltungen, reicht der Ziehbereich für viele Anwendungen aus.



Quarzoszillatoren (2)

HERRMANN SCHREIBER

Es ist zwar üblich, aber vielleicht nicht ganz richtig, von Oberwellen des Quarzes zu sprechen. Anstatt einer Halbwelle teilen sich 3, 5 oder 7 den Quarz, und was dabei herauskommt, ist eine Partialresonanz. Genau genommen zerfällt sie wieder in eine Serien- und eine Parallelresonanz.

Mit der Meßschaltung in Bild 1 kann man das gut darstellen und dabei Bestätigung finden für die Theorie, nach der sich der relative Abstand zwischen diesen Resonanzen mit dem Quadrat der Oberwellenordnung verringert. Dasselbe gilt natürlich für die Ziehbreite. Deshalb ist oft ein Grundwellenoszillator mit nachgeschalteter Frequenzvervielfachung günstiger. Ob ein Quarz für Partialresonanz geschliffen ist, das ist meist nicht aufgedruckt. Wenn seine Nominalfrequenz über 25 MHz liegt, ist das jedoch wahrscheinlich. Klarheit verschaffen kann man sich durch Einsatz des Quarzes in einen Grundwellenoszillator oder durch Ausmessen seiner Resonanzen (Bild 1).

■ Oszillator in Emitterschaltung

In Bild 14 liegt der Quarz zwischen Kollektor und Basis. Im Prinzip kann das zwar keinen Oszillator geben, denn zwischen diesen beiden Elektroden herrscht ein Phasenunterschied von 180°. Aber wenn Quarz und LC-Kreis mit je 90° beisteuern, dann stimmt es

wieder. Das ist auch leicht möglich, denn eine Phasenverschiebung von 90° erhält man bereits bei -3 dB neben der Spitze der Resonanzkurve.

Die Schaltung ist weitgehend unkritisch, da sie kaum anders als quarzbedingt schwingen kann. Getestet wurde sie auf Grundwelle und mit Partialerschwingungen dritter Ordnung bis 45 MHz. Bei Versuchen mit höherer Ordnung oder höheren Grundfrequenzen blieben die Schwingungen aus.

Die Eigenresonanz des LC-Kreises liegt immer etwas unter der Partialresonanz. Für C sind Werte zwischen 10 und 100 pF brauchbar. Es kann vorkommen, daß der Kollektorstrom bei Einsetzen der Schwingungen stark ansteigt. Man kann diese Erscheinung verringern, indem man den Kollektor an einen Spulenabgriff legt.

Die Abstimmung des LC-Kreises hat einen gewissen Einfluß auf die Frequenz. Von den vier getesteten Oberwellenquarzen ließ sich einer auf diese Weise auf seine Nominalfrequenz ziehen, allerdings dem Abbruch der Schwingungen recht nahe.

Die drei anderen blieben bis 10^{-4} darüber, offenbar, weil die Betriebsbedingungen der Parallelresonanz recht nahe sind. Ein Nachstimmen mit Korrekturspule dürfte jedoch möglich sein.

■ Oszillator in Basisschaltung

Die Basis liegt in Bild 15 mit 10 nF an Masse. Es bleiben Emitter und Kollektor, aber zwischen denen herrscht Phasengleichheit. Also kann es auch über die Parallelkapazität des Quarzes zu Schwingungen kommen, auf nicht orthodoxen Frequenzen. Gewiß kann man den LC-Kreis so abstimmen, daß diese Schwingungen vom Quarz synchronisiert werden, aber da man nie weiß, wie lange so etwas hält...

Die klassische Lösung des Problems besteht im „Wegstimmen“ der Quarzkapazität durch eine parallelgeschaltete Spule oder durch eine Neutroden-Schaltung, zu der man ebenfalls eine Spule braucht, die man auf jeden Fall so anordnen muß, daß sie sich weder mit der Abstimmungsspule verkoppeln kann noch mit der Drossel, die oft als Ersatz oder Ergänzung des Emitterwiderstands vorgeschlagen wird.

Rationeller erscheint es, den Spulenabgriff für den Quarz, in Bild 15, so nahe ans „kalte“ Ende der Spule zu legen, daß die Mitkopplung nur noch für partielle Serienresonanz reicht.

Ganz einfach ist das auch nicht, denn da man es oft mit Spulen von 3 bis 5 Windungen zu tun hat, kann besagter Abgriff bei weit weniger als einer halben Windung liegen. Unter solchen Bedingungen spielt auch die Kopplung zwischen Zuleitung zum Quarz und Spule eine Rolle, sowie die Entkopplung der Betriebsspannung gegenüber dem Referenzpunkt, hier die Basis.

Direkte Verbindungen, besonders auf Leiterplatten, haben nur niedrige Impedanz. Da das aber auch für die Quarzresonanz gilt, sind die Verbindungsprobleme wesentlich heikler als bei einem LC-Resonator.

Auch bei Beachtung dieser Eigenheiten der Schaltung ist einiges Experimentieren nötig, bis man zu jeder Arbeitsfrequenz und Partialordnung das passende LC-Verhältnis nebst optimaler Lage des Spulenabgriffs und der Entkopplungselemente gefunden hat. In den meisten Fällen kann man dann schon durch entsprechende Abstimmung des LC-Kreises die vorgesehene Partialfrequenz erhalten. Ein Ziehkondensator ist auch verwendbar, denn da hier Serienresonanz vorliegt, kann es allenfalls nötig sein, die Frequenz nach oben zu ziehen.

Quarze verschiedenster Nennfrequenzen wurden mit Erfolg in Partialresonanz dritter und fünfter Ordnung betrieben, manche sprachen auch bei siebenter Ordnung noch an. Bei den vorher in Grundwellenschal-

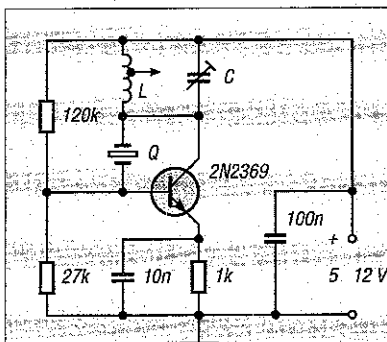


Bild 14: Die Betriebsbedingungen dieses Oszillator für Partialresonanz dritter Ordnung sind wenig kritisch, da außerhalb der Quarzresonanz kaum Schwingungen auftreten können.

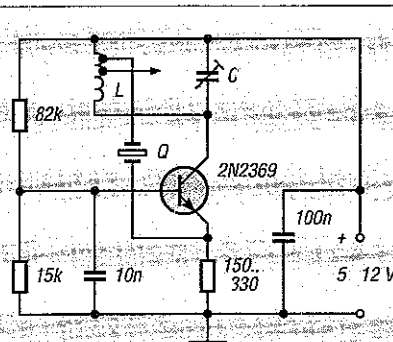


Bild 15: Dieser Oszillator für Partialresonanzen dritter und fünfter Ordnung ist bis mindestens 120 MHz verwendbar, aber kritisch im Aufbau und im Abgleich.

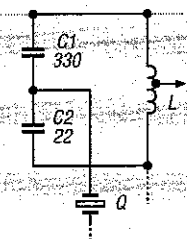


Bild 16: Ersatz des Spulenabgriffs in Bild 15 durch einen Spannungsteiler mit Kondensatoren.

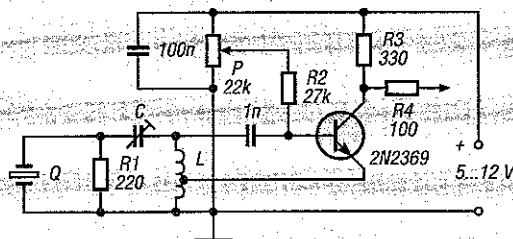


Bild 17: Die Kollektorschaltung gestattet mindestens bis 75 MHz verwendbare Oszillatoren für Partialresonanzen dritter und fünfter Ordnung.

tungen ausprobierten Quarzen für 15 und 24 MHz konnte recht genau das Drei- und Fünffache der Nennfrequenz erhalten werden, maximal 120 MHz.

Den Spulenabgriff in Bild 15 kann man, wie in Bild 16 angedeutet, durch einen kapazitiven Spannungsteiler ersetzen. Die Induktivitäten der Kondensatoranschlüsse müssen sehr geringgehalten werden, also am besten Bauteile für Oberflächenmontage verwenden. C₁ kann ein Abgleichtrimmer sein, eine Spule mit Abgleichkern ist ebenfalls verwendbar.

■ Oszillator in Kollektorschaltung

Eigentlich müßte der Kollektor in Bild 17 den Referenzpunkt der Schaltung bilden. Es ist aber durchaus möglich, dort einen Lastwiderstand R₃ einzufügen, wenn man Rückwirkungen durch eine eventuell kritische

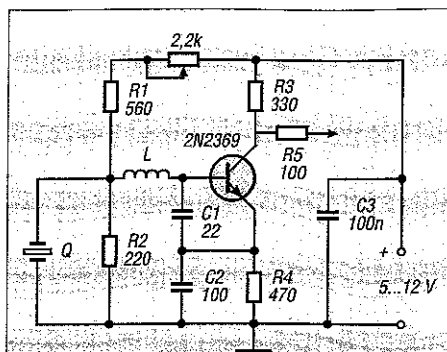


Bild 18: Ein kapazitiver Spannungsteiler kann den Spulenabgriff in Bild 18 ersetzen. Der Abgleich kann durch Beeinflussung von L erfolgen.

Impedanz der nachgeschalteten Last durch R₄ (47...220 Ω) vermeidet.

Wenn man Q und damit auch R₁ kurzschließt, erhält man einen Oszillator mit L und C. Seine Frequenz ist etwas unterhalb der vorgesehenen Arbeitsfrequenz einzustellen. Nach Aufheben des Kurzschlusses wird die dämpfende Wirkung von R₁ kaum Schwingungen zulassen, die ausschließlich auf der Parallelkapazität des Quarzes und L basieren. Die Schwingfrequenz wird also nur von der Resonanz des Quarzes abhängen.

Das Potentiometer P gestattet Einstellen des Arbeitspunktes (I_C = 1...10 mA) besonders in Abhängigkeit von der Betriebsspannung. Der Spulenabgriff (bei etwa 1/5 der Gesamtwindungszahl) ist weniger kritisch als beim vorigen Beispiel. Mit Erfolg getestet wurde die Schaltung unter anderem mit einem 15-MHz-Quarz bis 75 MHz und mit einem 24-MHz-Quarz bis 72 MHz. Die erhaltenen Frequenzwerte lagen zwischen denen der beiden vorher beschriebenen Schaltungen.

Den Ersatz des Spulenabgriffs durch einen kapazitiven Spannungsteiler zeigt Bild 18.

Wie erkennt man den kleinen Unterschied?

Nicht alle Veröffentlichungen erhalten ausreichende Angaben über den Funktionstyp eines Quarzoszillators. Unterlagen von Herstellern dienen meist eher dazu, dem Leser die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten eines Bauteils zu zeigen, als ihm genau zu erklären, was da abläuft.

Es gibt jedoch einfache Merkmale, mit denen man Oszillatoren in Serien- oder Parallelresonanz leicht voneinander unterscheiden kann. Wenn das Quarz an einer Steuerelektrode (Basis oder Gate) liegt, dann werden Schwingungen auftreten, wenn dort die Spannung am höchsten ist. Es handelt sich also um Parallelresonanz. In unmittelbarer Nähe dieser Parallelresonanz liegt die Oszillatorfrequenz, wenn die Schwingungen nur durch eine starke Phasendrehung im Quarz zustandekommen können, beispielsweise, wenn letzteres zwischen der Basis eines Transistors und dessen an einen LC-Resonanzkreis geführten Kollektor geschaltet ist.

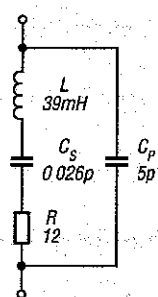
Bei Anschluß des Quarzes an eine Referenzelektrode (Emitter, Source) handelt es sich dagegen um Serienresonanz, da hier nicht viel Spannung, sondern viel Strom wichtig ist. Der Quarz dient dann im Prinzip als Koppelement, beispielsweise zwischen zwei Emittern, die es nur auf der Frequenz miteinander verbinden kann, auf der sein Widerstand minimal ist.

Der parallel zum Quarz liegende Widerstand R₂ wurde hier der Einfachheit halber mit in den Basisspannungsteiler einbezogen. Dadurch wird ein wesentlicher Teil der Speiseleistung in Wärme verwandelt.

Meinen Sie nicht auch, daß man das anders machen könnte? Einen Kondensator im Basisanschluß und dahinter ...

Es ist immer erstrebenswert, eher eine Schaltung seinen Wünschen anzupassen als seine Wünsche an eine vorgegebene Schaltung. Die Vielzahl der Schaltungsvorschläge bedeutet also nicht immer, daß jeder nach etwas anderem strebt. Es kann auch etwas im Einzelfall Besseres sein.

Ersatzschaltbild



Sicher haben Sie sie schon oft gesehen, die beistehende Ersatzschaltung. Deshalb hier nur das Wichtigste: Innerhalb des Quarzkristalls liegen L, der Verlustwiderstand R und die Serienkapazität C_s. C_p beschreibt die Kapazität der Armaturen und der Gehäusedurchführungen, dazu kommt die der Außenbeschaltung. Eine Serienresonanz erhält man bei Anschluß einer Spannungsquelle, deren Frequenz man auf maximale Stromstärke im Quarz abstimmt. Da man dann C_p vernachlässigen kann, ist die Resonanzfrequenz

$$f_s = 1/(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_s}) = 4,998 \text{ MHz}$$

mit den angegebenen Werten

Wenn man den Quarz mit einer gegenüber C_p vernachlässigbaren Kapazität an die Spannungsquelle ankoppelt, erhält man Parallelresonanz (maximale Spannung am Quarz) bei einer um

$$f_p - f_s = (C_s \cdot f_s) / (2 \cdot C_p)$$

höheren Frequenz, 13 kHz mit den Beispielswerten. Im Oszillator ist diese Differenz geringer, da C_p durch Schaltkapazitäten erweitert wird. Änderungen dieser Kapazitäten, auch durch Temperaturgang, beeinflussen die Parallelresonanz daher schlechtere Stabilität.

Andererseits kann man, solange der Oszillator da noch mitmacht, C_p durch äußere Beschaltung so weit erhöhen, daß die Frequenz der Serienresonanz fast wieder erreicht wird, wobei, wie sich leicht berechnen läßt, Änderungen der Parallelkapazität nur noch wenig Wirkung haben. Der Gütefaktor, $Q = 2 \cdot \pi \cdot f_s / R$, beträgt mit den Beispielswerten etwa 100 000.

Berechnen kann man die Elemente der Ersatzschaltung durch Messen der beiden Resonanzfrequenzen (Bild 1) und Bestimmung von C_p durch eine Brücken- oder Resonanzmethode, weit unter der Nennfrequenz des Quarzes. Q kann man durch Messung der 3-dB-Bandbreite B (beiderseits der Serienresonanz) durch $Q = f_{\text{form}} / B$ erhalten.

Tips und Kniffe: Strom aus dem Hometrainer

Für verhältnismäßig wenig Geld – insgesamt habe ich 50 DM aufgewendet – kann man mit einfachen handwerklichen Mitteln durch Umbau von nicht genutzten Hometrainern, wie sie auch häufig beim Sperrmüll stehen, einen Tretkurbelgenerator unter Einsatz des von der Firma Oppermann als Surplus angebotenen Dynamos DYM 40 bauen, der etwa 1,5 A Gleichstrom in einen Akku (Blei oder Nickel) liefert. Dabei muß man nicht mehr Kraft aufwenden als für gemütliches Radfahren in der Ebene.

Solche Geräte in kommerzieller Ausführung waren früher bei den Armeen der Welt weit verbreitet. Anscheinend aus dieser Quelle stammen wohl auch die angebotenen Genera-

toren, denn anders ist der günstige Preis nicht zu erklären. Klaus Böttcher, DJ3RW



Der zum Tretkurbelgenerator umgebaute Hometrainer Foto: DJ3RW