

PLL-Schaltungen

Die PLL-Technik ist heutzutage eine weit verbreitete Schaltungstechnik und findet Anwendung in fast allen Bereichen der Elektronik. Der vorliegende Artikel beschreibt die grundsätzliche Funktionsweise und die Möglichkeiten.

Allgemeines

Bereits 1932 wurde das Verfahren der „phasengerasterten Schleife“ oder „Phase Locked Loop“, kurz „PLL“ genannt, publik gemacht, konnte sich aber erst mit der Entwicklung entsprechender integrierter Schaltkreise durchsetzen.

Eine der Hauptanwendungsgebiete der PLL-Technik ist zweifellos die Frequenzsynthese, d. h. die Erzeugung von genau definierten Frequenzen. Insbesondere wenn an die zu generierende Frequenz hohe Anforderungen bezüglich der Frequenzstabilität gestellt werden, und es sich zudem noch um eine Frequenz >100 MHz handelt, bietet die PLL-Technik entscheidende Vorteile.

Da sich Quarzoszillatoren nicht direkt bei beliebig hohen Frequenzen betreiben lassen (oberhalb 100 MHz), wäre eine entsprechende Frequenzvervielfacherschaltung erforderlich. Die Frequenzvervielfachung erfolgt im allgemeinen durch Verzerrung der sinusförmigen Oszillatorspan-

jeweils den Quarzoszillator entsprechend austauschen oder umschalten und zusätzlich jede Vervielfacherstufe neu abgleichen.

Ein sogenannter Synthesizer-Oszillator auf der Basis einer Phasenregelschleife hat diese Nachteile nicht. Eine solche PLL-Schaltung besteht aus einem spannungsge- steuerten Oszillator, der von einem Phasenvergleicher über einen Regelverstärker (Verstärker mit Tiefpaßcharakter oder einfach nur ein Tiefpaß) solange nachgeregelt wird, bis dessen Frequenz und Phase mit dem vorgegebenen Referenzsignal übereinstimmt.

Meistens befindet sich zwischen VCO (Voltage Controlled Oscillator) und Phasenvergleicher eine einstellbare Teilerstufe, wodurch die Ausgangsfrequenz gewählt bzw. in einem bestimmten Raster geändert werden kann.

Abbildung 1 zeigt das Schaltungsprinzip eines solchen einfachen PLL-Synthesizers.

Neben dieser einfachen Grundstruktur werden je nach erforderlichlichem Ausgangs-

schleifen auch hervorragend zur Modulation und Demodulation geeignet.

Nehmen wir an, die Regelbandbreite der in Abbildung 1 gezeigten PLL-Schaltung wäre durch eine entsprechende Auslegung des Regelverstärkers auf ca. 1 Hz begrenzt. Die PLL-Schaltung ist hierdurch weiterhin in der Lage, langsame Frequenzänderungen des VCO auszuregeln, wodurch sich eine immer noch stabile Ausgangsfrequenz ergibt. Oberhalb der Regelbandbreite kann nun eine direkte Modulation der Abstimmspannung für den VCO vorgenommen werden, wodurch sich am Ausgang der PLL-Struktur ein frequenzstabiles FM-moduliertes Ausgangssignal ergibt. Diese Art der FM-Modulation wird heute üblicherweise in fast allen FM-Funkgeräten eingesetzt. Die Wahl des Schleifenfilters legt die untere Modulationsfrequenz fest, da Modulationsanteile unterhalb der Regelfrequenz automatisch mit ausgeglichen werden. Einen FM-Demodulator erhalten wir, indem das Schleifenfilter so dimensioniert ist, daß die Regelschleife in der Lage ist, auch die höchste vorkommende Modulationsfrequenz auszuregeln. Wenn nun anstelle des Referenzsignals ein FM-moduliertes Signal am Phasenvergleicher anliegt, so folgt bei korrekter Dimensionierung des Regelverstärkers die VCO-Frequenz dem Eingangssignal. Die Abstimmspannung des VCOs entspricht nun dem zur Modulation verwendeten NF-Signal.

Nach diesen Vorbetrachtungen, die aufgrund der vielfältigen Schaltungsmöglichkeiten und Anwendungen sowie durch die Komplexität der Möglichkeiten dieses Thema nur in seinen wesentlichen Zügen beschreiben kann, wollen wir uns jetzt der praktischen Seite zuwenden.

Für diejenigen unter unseren Lesern, die sich näher mit dieser Technologie befassen möchten, und dazu auch einige praktische Erfahrungen sammeln wollen, haben wir eine universell ausgelegte Schaltung entwickelt, die auf einer 53 x 58 mm messenden Leiterplatte aufgebaut wird.

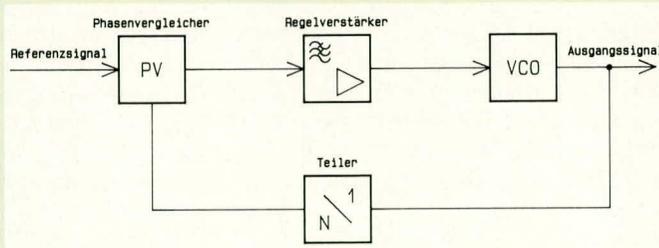
PLL-Experimentierschaltung

Abbildung 2 zeigt die Schaltung der kleinen Experimentierplatine. Als zentrales Bauelement haben wir mit dem CMOS-Baustein CD 4046 einen der wohl bekanntesten und auch wohl preiswertesten PLL-Bausteine ausgewählt. Neben zwei unterschiedlichen Phasendetektoren verfügt der CD 4046 über eine interne VCO-Schaltung, die, mit nur wenigen externen Bauelementen beschaltet, vom unteren Hörbereich bis hinauf zu etwa 1,5 MHz arbeitet.

Schaltung

Durch den 14stufigen Binärzähler mit interner Oszillatorschaltung des Typs CD

Bild 1:
Prinzipschaltbild eines einfachen PLL-Synthesizers



nung an einer nicht linearen Kennlinie. Aus den so entstandenen Oberwellen

wird mit einem Schwingkreis hoher Güte die gewünschte Oberwelle herausgefiltert.

Mit einer Transistorstufe läßt sich in der Regel eine Frequenzverdoppelung bis Vervielfachung erreichen. Für eine Frequenz im GHz-Bereich sind also schon mehrere Transistorstufen erforderlich, die jeweils entsprechend abzugleichen sind.

Bei zahlreichen Anwendungen z. B. in der Unterhaltungselektronik, ist eine definierte Erzeugung von Frequenzrastern gefordert. So wird heute bei nahezu jedem Fernsehgerät, bei Videorecordern und bei Satelliten-Receivern eine bestimmte Frequenz oder der entsprechende Kanal eingegeben, und schon steht der richtige Sender zur Verfügung. Mit der vorstehend beschriebenen Methode der Frequenzvervielfachung ist das hierfür erforderliche Frequenzraster mit vertretbarem Aufwand nicht zu realisieren. Man müßte hierfür

frequenzbereich und Frequenzraster weitere verschiedene PLL-Synthesizer-Strukturen z. B. auch in Verbindung mit Mischstufen oder schaltenden Vorteilern (Dual-Modulus-Vorteiler) angewendet, die hier nur der Vollständigkeit halber Erwähnung finden.

Ein weiteres, sehr wichtiges Kriterium für die Auswahl eines PLL-Systems ist die Qualität des Ausgangssignals, d. h. verschiedene PLL-Strukturen zeigen unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Ausgangsfrequenzjitter, Störmodulationen, Rauschen usw..

Um ein möglichst gutes Regelverhalten zu erzielen, und damit eine stabile Ausgangsfrequenz, ist die Auslegung des Regelverstärkers und des Schleifenfilters von entscheidender Bedeutung.

Neben der Verwendung in reinen Synthesizer-Schaltungen sind Phasenregel-

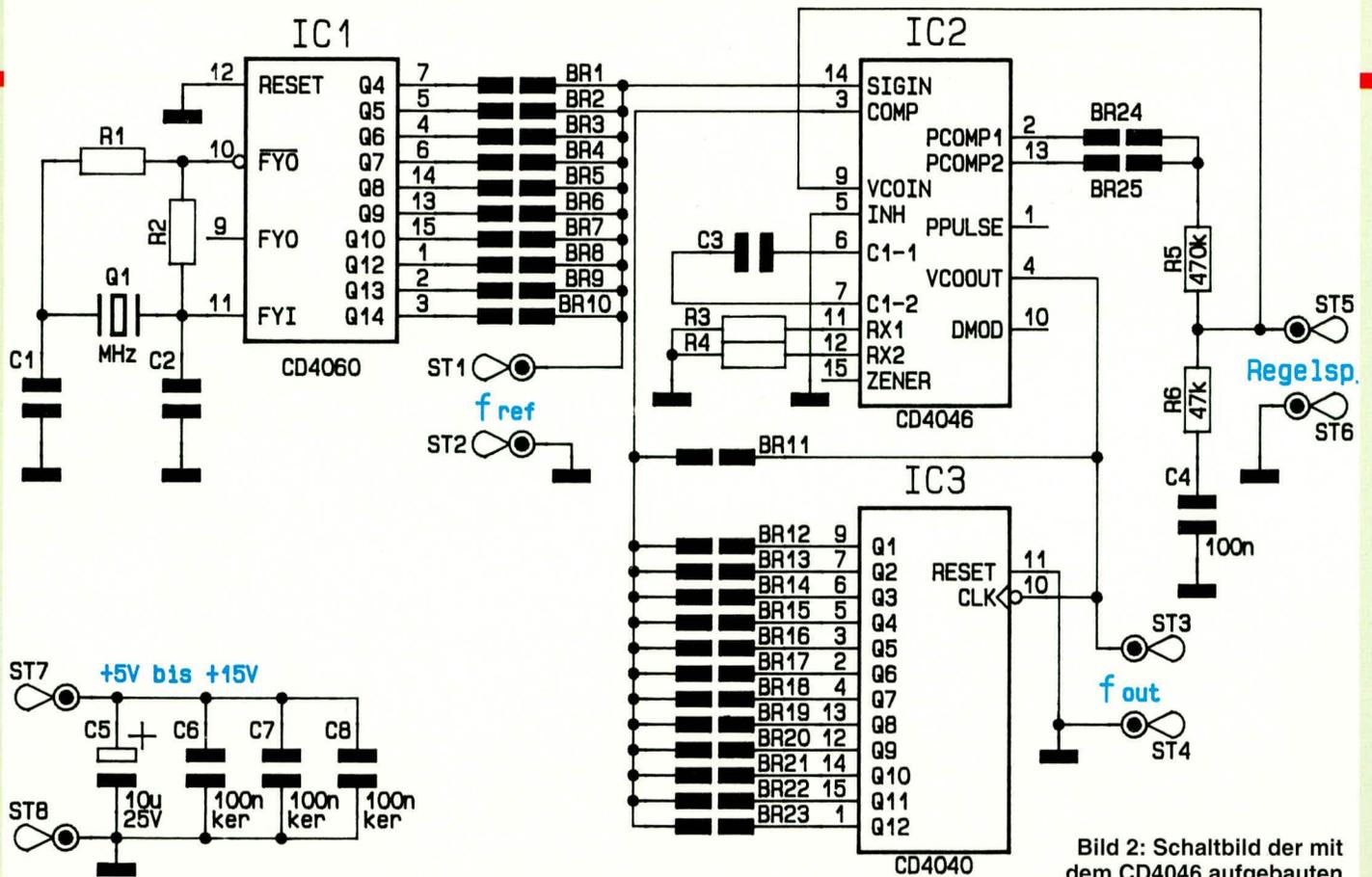


Bild 2: Schaltbild der mit dem CD4046 aufgebauten Experimentierplatine

4060 (IC 1), in Verbindung mit der externen Beschaltung, bestehend aus R 1, R 2 und C 1, C 2 sowie dem Quarz Q 1, wird das Referenzsignal (vergleiche auch Abbildung 1) gebildet. Durch die Verwendung eines Quarzoszillators mit anschließender Teilerstufe ergeben sich neben der erforderlichen stabilen Referenzfrequenz zusätzlich die Möglichkeiten einer weiten Variation. Durch den Einbau unterschiedlicher Quarze sowie das Setzen der entsprechenden Brücken (Brücken BR 1 bis BR 10 werden durch Lötinnbrücken gesetzt), können eine Vielzahl verschiedener Referenzfrequenzen erzeugt werden. An den Lötstiften ST 1 und ST 2 ist die Referenzfrequenz zu Kontrollzwecken meßbar.

Soll hingegen die PLL-Schaltung zur Demodulation von FM-Signalen Einsatz finden, so wird an ST 1 und ST 2 das FM-Signal angelegt, wobei dann die Brücken BR 1 bis BR 10 geöffnet sein müssen.

Das Referenzsignal bzw. das FM-Signal gelangt zum Pin 14 des IC 2, dem Signaleingang der Phasenkomparatoren. Wie vorstehend bereits beschrieben, verfügt der CD 4046 über 2 unterschiedliche Phasenkomparatoren. Durch die Brücken BR 24 und BR 25 wird ausgewählt, welcher der beiden Phasenkomparatoren die Steuerung des VCOs übernehmen soll.

Die Widerstände R 5 und R 6 sowie der Kondensator C 4 bilden das sogenannte Schleifenfilter, auf dessen Dimensionierung wir noch näher eingehen. Der Mittelabgriff zwischen den beiden Widerständen R 5, R 6 ist direkt mit dem VCO-Steureingang (VCOIN, Pin 9) verbunden. Um die

Messung der Regel- oder auch Abstimmspannung zu erleichtern, sind wiederum 2 Lötstifte (ST 5 und ST 6) vorgesehen. Für den Einsatz der Schaltung zur FM-Demodulation wird an dieser Stelle das NF-Signal abgegriffen.

Das Ausgangssignal des VCO steht an Pin 4 des IC 2 zur Verfügung und kann an den Lötstiften ST 3 und ST 4, die mit f_{out} bezeichnet sind, abgenommen werden. Durch den Kondensator C 3 sowie die Widerstände R 3, R 4 wird der Frequenzbereich des VCOs bestimmt.

Zur Erweiterung des Ausgangsfrequenzbereiches der gesamten PLL-Schaltung wurde mit IC 3 ein weiterer Teiler realisiert. Bevor der Regelkreis geschlossen wird, d. h. die Ausgangsfrequenz des VCOs auf den Komparator-Eingang (Pin 3 des IC 2) gelangt, kann je nach eingelöteter Brücke (BR 11 bis BR 23) eine Teilung der VCO-Ausgangsfrequenz erfolgen. Es stehen Teilerfunktionen von 2 bis $2^{12} = 4096$ zur Verfügung.

Soll keine Teilung erfolgen, so wird die Brücke BR 11 eingelötet, womit die Ausgangsfrequenz direkt zum Komparatoreingang gelangt. Das IC 3 entspricht exakt dem im Blockschaltbild 1 eingezeichneten Teiler. Somit ergibt sich der Zusammenhang zwischen Quarzfrequenz und Ausgangsfrequenz nach der Formel:

$$f_{out} = f_{Q1} \cdot \frac{\text{Teilerfaktor des IC 3}}{\text{Teilerfaktor des IC 1}}$$

Die Betriebsspannung, die im Bereich zwischen 5 V und 15 V liegen darf, wird über die Lötstifte ST 7 und ST 8 zugeführt.

Die Kondensatoren C 5 bis C 8 dienen der allgemeinen Störunterdrückung.

Nach der Beschreibung der Schaltung wollen wir uns nun mit der Dimensionierung des Referenzoszillators, der externen VCO-Beschaltung sowie der wichtigen Auslegung des Schleifenfilters zuwenden.

Schaltungsdimensionierung

Zunächst sind die Widerstände R 1 und R 2 sowie die Kondensatoren C 1 und C 2 des Referenzoszillators in Verbindung mit dem Quarz Q 1 festzulegen. Um hier die Dimensionierung zu erleichtern, haben wir für den Frequenzbereich von 25 kHz bis hinauf zu 2 MHz die zu verwendenden Bauteilewerte in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Die angegebenen Werte der Bauelemente

Tabelle 1				
Frequenz	R 1	R 2	C 1	C 2
25 - 60 kHz	470 kΩ	22 MΩ	20 pF	10 pF
60 - 130 kHz	330 kΩ	22 MΩ	10 pF	4,7 pF
130-200 kHz	220 kΩ	22 MΩ	10 pF	-
200-350 kHz	150 kΩ	10 MΩ	4,7 pF	4,7 pF
350-500 kHz	100 kΩ	10 MΩ	4,7 pF	-
500-700 kHz	68 kΩ	8,2 MΩ	4,7 pF	-
0,7 -1,3 MHz	10 kΩ	10 MΩ	4,7 pF	-
1,3 - 2 MHz	8,2 kΩ	10 MΩ	4,7 pF	-

sind stark von den Eigenschaften des eingesetzten Quarzes abhängig und können daher nur als Richtwerte gelten. Schwingt der Referenzoszillator nicht einwandfrei an, oder auf einer falschen Frequenz, so sind die externen Bauelemente gegebenenfalls so zu verändern, daß eine ord-

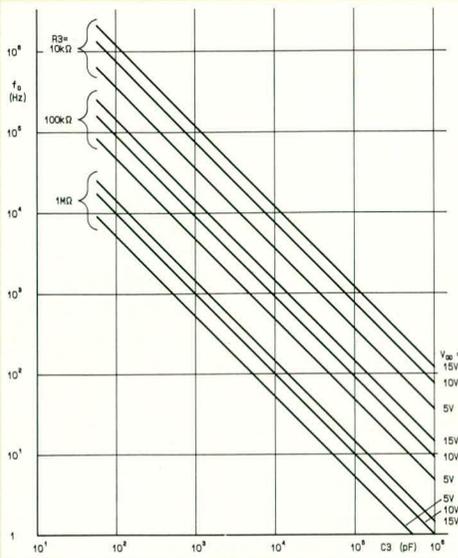


Bild 3: Diagramm zur Bestimmung der externen VCO-Bauelemente

nungsgemäße Funktion sichergestellt ist.

Kommen wir nun zur Dimensionierung der externen Bauelemente des spannungsgesteuerten Oszillators. Der Bereich der Mittenfrequenz wird durch den Kondensator C 3 bestimmt. Die maximale Frequenz des VCOs legt R 3 fest, während mit R 4 ein Frequenz-Offset erfolgt. Sofern kein Frequenz-Offset gewünscht ist, entfällt R 4, d. h. $R 4 = \infty$. In diesem Fall beginnt die VCO-Frequenz bei einer Abstimmspannung von 0 V mit der niedrigsten Frequenz, die ebenfalls annähernd bei 0 Hz liegt.

Um später eine möglichst stabile Ausgangsfrequenz zu erhalten, ist es jedoch ratsam, den VCO-Frequenzbereich soweit wie möglich einzuengen. Die Bestimmung des Widerstandswertes für R 3 sowie den Wert des Kondensators erfolgt anhand des

Tabelle 2

PCOMP1 (Pin 2)

- Haltebereich $\pm 30\%$
- rauschunempfindlich
- 90° Phasenbezug zwischen SIGIN und COMP (Pin 14 und Pin 3)
- empfindlich gegen Harmonische
- Schleifenfilter arbeitet als Integrator

PCOMP 2 (Pin 13)

- Großer Frequenzbereich bis 1000 : 1
- rauschempfindlich
- beliebiges Tastverhältnis der Eingangssignale
- 0° Phasenbezug zwischen SIGIN und COMP (Pin 14 und Pin 3)
- unempfindlich gegen Harmonische
- Schleifenfilter arbeitet als Sample-and-Hold

Abschließend kommen wir zur Auswahl des Phasendetektors und zur Dimensionierung des Schleifenfilters.

Die 2 im CD4046 integrierten Phasendetektoren besitzen sehr unterschiedliche Eigenschaften. Daher ist die richtige Auswahl mitentscheidend für eine optimale Funktion der PLL-Schaltung. Tabelle 2 zeigt in übersichtlicher Form die wesentlichen Unterschiede der Phasendetektoren und erleichtert so die richtige Auswahl.

Nachdem nun Referenzoszillator und VCO korrekt dimensioniert sind und auch der richtige Phasendetektor gefunden ist, wird der Regelkreis mit dem Schleifenfilter geschlossen. Obwohl der Schleifenfilter aus lediglich 3 Bauelementen besteht (R 5, R 6 und C 4), ist die korrekte Auslegung für die Stabilität der Ausgangsfrequenz von entscheidender Wichtigkeit. Eine universelle, immer passende Dimensionierung ist nicht möglich. Die im Schaltbild angegebenen Werte können lediglich als gute Startdimensionierung dienen, wobei eine genaue Dimensionierung des Filters durch entsprechende Versuche herbeizuführen ist.

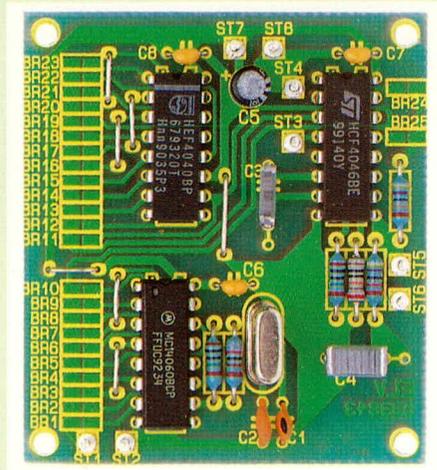
Eine zu große Zeitkonstante für R 5/C 4 macht die PLL-Schaltung langsam. Hierdurch können schnelle Änderungen der Eingangsfrequenz nicht mehr ausgegletzt werden. Ist die RC-Zeitkonstante hingegen zu klein gewählt, so wird die Ausgangsfrequenz unruhig und beginnt zu jittern.

Das Widerstandsverhältnis R 5 zu R 6 bestimmt die Dämpfung des Systems. Wird der Widerstand R 6 zu groß gewählt, so ist die PLL-Schleife zu träge, um sich auf eine neue Eingangsfrequenz einzustellen. Ein zu kleiner Widerstandswert von R 6 oder gar 0Ω führt zum Prellen, Überschwingen oder die gesamte PLL-Schleife neigt zu Eigenschwingungen.

Nachbau

Die Bestückung der kleinen, einseitig ausgeführten Leiterplatte erfolgt in gewohnter Weise anhand der Stückliste und des Bestückungsplans bzw. des Bestückungsaufdrucks auf der Leiterplatte.

Zuerst werden die niedrigen Bauelemente, gefolgt von den größeren Bauteilen und schließlich den Halbleitern eingelötet.



Ansicht der fertig aufgebauten Experimentierplatine

in Abbildung 3 dargestellten Diagramms. Für Widerstandswerte von 10 k Ω , 100 k Ω und 1 M Ω (für R 3) ist hier der Ausgangsfrequenzbereich des VCOs in Abhängigkeit von dem Kondensatorwert von C 3 aufgetragen.

Stückliste: PLL--Schaltungen

Widerstände:

- siehe Text R1, R2, R3, R4
47k Ω R6
470k Ω R5

Kondensatoren:

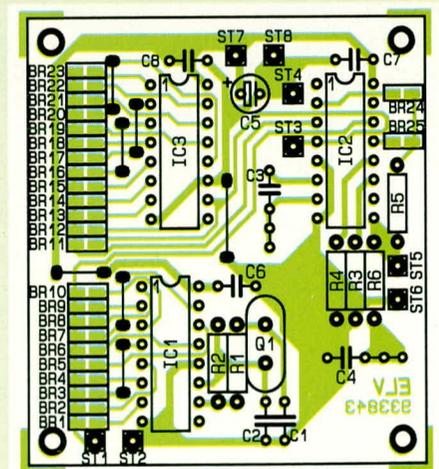
- siehe Text C1, C2
siehe Text C3
100nF C4
100nF/ker C6 -C8
10 μ F/25V C5

Halbleiter:

- CD4040 IC3
CD4046 IC2
CD4060 IC1

Sonstiges:

- Quarz, siehe Text Q1
8 Lötstifte1,3mm



Bestückungsplan zur einseitig ausgeführten Leiterplatte

Nachdem auch die übrigen, wie zuvor beschriebenen, dimensionierten Bauteile eingebaut sind, ist die Schaltung einsatzbereit, und Sie können mit Ihren Messungen und mit dem Experimentieren beginnen.