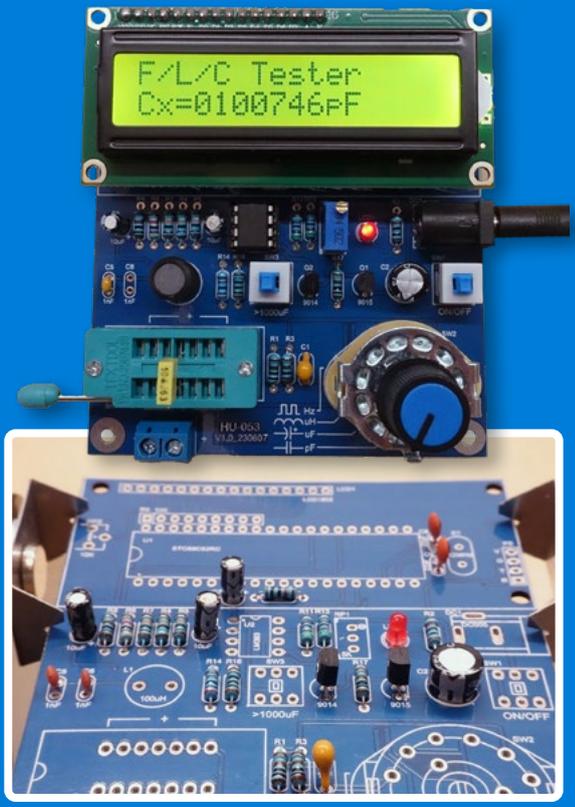
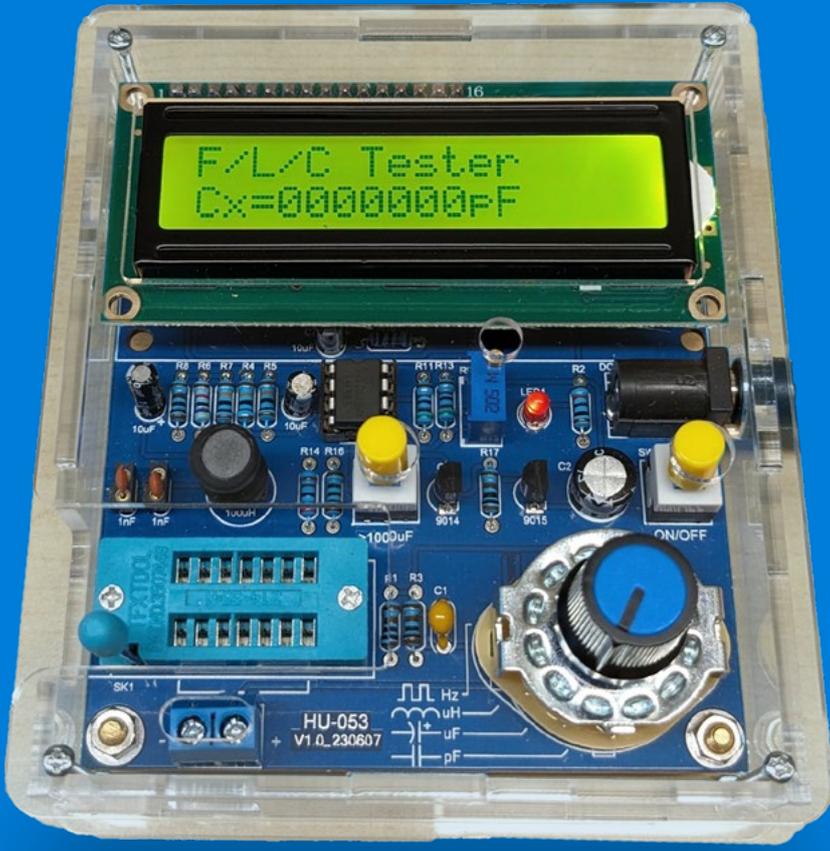


REVERSE ENGINEERING

EINES LC-METERS

Leistungsverbesserungen

$$F_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6)}}$$



$$F_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6 + C_x)}}$$



JETZT REGISTRIEREN:
www.elektormagazine.de/elektor-newsletter

Reverse Engineering eines LC-Meters



Leistungsverbesserungen

Von Jean-François Simon (Elektor)

In dieser zweiten Folge unserer Serie Reverse Project befassen wir uns mit dem Bausatz HU-053, einem preiswerten und sehr interessanten Kit, das online erhältlich ist. Es besteht aus Bauteilen zur Durchsteckmontage und einer transparenten Acrylbox. Der Bausatz HU-053 misst Kapazitäten, Induktivitäten und Frequenzen und ist damit ein großartiges Sonntagnachmittagsprojekt! Lassen Sie uns ein Reverse-Engineering durchführen und dabei die Funktionalität, Leistung und mögliche Verbesserungen untersuchen.



Bild 1. Das HU-053 LC-Messgerät.

Der Bausatz HU-053 besteht aus einer doppelseitigen Leiterplatte, etwa vierzig Bauteilen und einem Satz von sechs vorgeschrittenen transparenten Acrylplatten. Außerdem enthält er alle für den Zusammenbau erforderlichen Schrauben und Muttern. Das Ergebnis ist das in **Bild 1** dargestellte kleine Gerät mit den Abmessungen 91 mm × 106 mm und einer Höhe von 28 mm. Die am besten erkennbaren Komponenten sind natürlich das klassische zweizeilige LC-Display mit 2×16 Zeichen, der STC89C52RC-Mikrocontroller in seinem großen DIP-40-Gehäuse, ein dreipoliger Schalter mit vier Positionen (3P4T) zur Auswahl von Funktionen und eine ZIF-Buchse (Zero Insertion Force) zum Anschluss der zu testenden Komponenten. Das Gerät wird über eine 5-V-Versorgung gespeist, z. B. über ein USB-Ladegerät. Ein Adapter von USB-A auf 5,5-mm-Hohlstecker (Außendurchmesser) wird mitgeliefert.

Funktionen und Messbereiche

Die vier Messfunktionen des Geräts sind: Kapazität nicht polarisierter Kondensatoren (1 pF bis 2200 pF), Kapazität polarisierter Kondensatoren (1 µF bis 12000 µF), Induktivität (1 µH bis 1 H) und Frequenz (20 Hz bis 400 kHz). Das sind die Bereiche, die auf der Produktseite des Herstellers angegeben sind. Es scheint jedoch so zu sein, dass der

erste Bereich tatsächlich viel größer ist als angegeben. Ich habe in diesem Modus erfolgreich Kapazitäten von über 1 µF gemessen. Wahrscheinlich ein Tippfehler, der nie korrigiert wurde! Die anderen Bereiche habe ich nicht überprüft, da ich keine ausreichend großen Kondensatoren oder Induktivitäten zur Hand hatte.

Allerdings lässt die Messgenauigkeit etwas zu wünschen übrig, wie wir später sehen werden. Dieses Gerät ist eher ein Lehrstück über Messtechnik und Schwingkreise als ein echtes Messgerät. Wenn Sie bereits ein LC(R)-Messgerät besitzen, können Sie sich einen Spaß daraus machen, die Messungen des HU-053 mit denen Ihres eigenen Geräts zu vergleichen.

Der Zusammenbau

Die Montage ist einfach, da eine bebilderte Anleitung mitgeliefert wird. Wie üblich ist die Übersetzung des Herstellers vom Chinesischen ins Englische unvollkommen, aber die Fotos helfen. Eine Online-Anleitung ist auch unter [1] verfügbar. Beginnen Sie mit dem Einlöten der kleinsten Bauteile (**Bild 2**), z. B. der Widerstände, und bauen Sie die Bauteile in der Reihenfolge ihrer Größe ein. Der Bausatz enthält Extra-Widerstände (einen pro Widerstands-Wert), was ein wenig irreführend ist, aber kein Grund zur Sorge. Überprüfen Sie die Lötstellen mit

einer Lupe oder einem Mikroskop, bevor Sie die Stromversorgung einschalten. Vergewissern Sie sich außerdem, dass Ihr Netzteil 5 V liefert, da auf der Platine kein Spannungsregler vorhanden ist; jede höhere Eingangsspannung würde den Mikrocontroller zerstören. Stellen Sie das Potentiometer RP2 ein, um den richtigen Kontrast auf dem Display zu erhalten. Stellen Sie schließlich das Potentiometer RP1 ein, bis Sie eine Spannung von 3,16 V an Pin 5 des Komparators U2 erhalten.

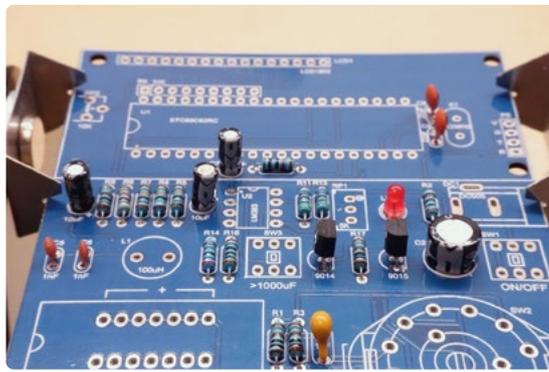


Bild 2. Beginnen Sie mit den kleinsten Bauteilen.

Houston, wir haben ein Problem ...

Bei den ersten Tests scheint der Bereich für kleine Kondensatoren (für nicht polarisierte Kondensatoren) einen erheblichen Messfehler aufzuweisen. Obwohl das Gerät kalibriert wurde, indem man die Taste SW3 so lange drückt, bis das Display *Complete* anzeigt, und sie dann loslässt, weist das Gerät Messabweichungen von über 30 % im Vergleich zu meinem bewährten DE-5000 auf. Zum Beispiel zeigt es einen 100 pF-Kondensator als 64 pF an, 1 nF als 650 pF, 100 nF als 73 nF usw. (Bild 3). Was ist da nur los?



Bild 3. Eine Vergleichsmessung mit einem anderen Messgerät. Irgend etwas stimmt hier nicht!

Und hier die Lösung des Problems!

Mehr dazu später, aber erst einmal gibt es eine schnelle Lösung. Die Kondensatoren C5 und C6, zwei Keramik-Kondensatoren von je 1 nF, sind parallel geschaltet und dienen als Referenz für die Messung. Sie sind also die Hauptverdächtigen. Ihr Wert wird mit einem DE-5000 LCR-Meter gemessen, und das Ergebnis ist in Bild 4 dargestellt. Wie man sieht, sind sie viel größer als 1 nF: 1,5 nF bei dem einen und fast 1,8 nF bei dem anderen. Wahrscheinlich handelt es sich um sehr preiswerte Kondensatoren der Klasse Z (-20 % bis +80 %). Möglicherweise handelt es sich auch um Ausschussware für andere Toleranzklassen, die umetikettiert wurde. Das Dielektrikum dieser Kondensatoren reagiert sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen, so dass sich der Wert bereits verändert, wenn Sie das Bauteil zwischen Ihren Fingern halten. All dies macht sie zu ungeeigneten Referenz-Kondensatoren. Leider schenken die Bausatzhersteller diesen Dingen nur wenig Aufmerksamkeit.



Bild 4. Diese Referenz-Kondensatoren von 1nF haben abweichende Werte.

Nachdem ich diese beiden Kondensatoren durch einen einzigen 2-nF-Kondensator (C0G, 5 %, von Kemet) ersetzte, konnte ich brauchbare Ergebnisse erzielen: siehe Bild 5, wo ein 100-nF-Kondensator gemessen wird. Die Toleranzklasse C0G verbessert die Temperatur- und Frequenzstabilität der Schaltung erheblich. Natürlich könnte sie noch weiter verbessert werden, indem man einen Referenzkondensator mit einer Toleranz von 1 % oder noch besser wählt, aber ich hatte keinen zur Hand. Für den Moment ist dieser Kondensator ausreichend.



Bild 5. Mit einem geeigneten Referenz-Kondensator erhalten wir brauchbare Messwerte.

Wie funktioniert die Schaltung?

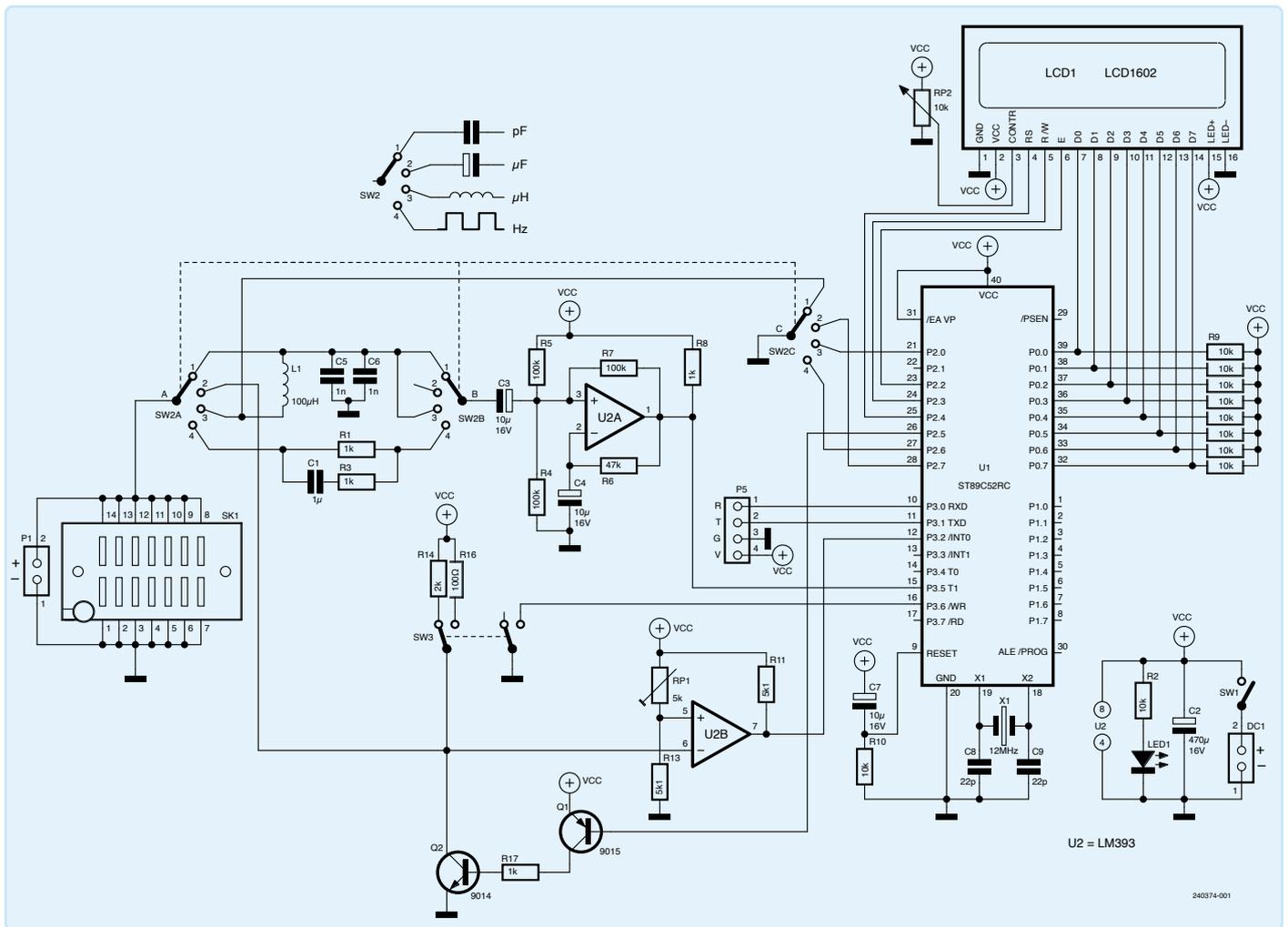
Der Schaltplan ist in Bild 6 dargestellt. Es wird ein LC-Parallelschwingkreis aufgebaut, der die Referenzinduktivität L1 und die Referenz-Kondensatoren C5 und C6 verwendet (die ihrerseits parallel geschaltet sind, so dass sie wie ein einziger Kondensator wirken). Die Resonanzfrequenz ist:

$$F_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6)}} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

Der Drehschalter SW2 dient zur Änderung der Grundschaltung:

- im pF-Modus wird der zu messende Kondensator Cx parallel zu den Referenzkondensatoren C5 und C6 geschaltet. Die Resonanzfrequenz ändert sich und wird zu:

$$F_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6 + C_x)}} \quad \text{(Gleichung 2)}$$



▲
Bild 6. Der Schaltplan.

- Im Induktivitätsmodus wird die zu messende Induktivität L_x in Reihe mit der Referenzinduktivität L_1 geschaltet. Die Resonanzfrequenz ändert sich zu:

$$F_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_x)(C_5 + C_6)}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Die Werte von L_1 , C_5 und C_6 sind im Voraus bekannt, so dass man nur noch die Frequenzen F_1 , F_2 oder F_3 messen muss, um die Werte von C_x oder L_x zu berechnen. Der Schaltkreis, der aus der Hälfte des Dualkomparators U_2 (einem LM393) besteht, sorgt für die Erhaltung der Oszillation auf der Resonanzfrequenz und erzeugt an seinem Ausgangspin ein Rechtecksignal mit eben dieser Frequenz. Dieses Signal wird an den Mikrocontroller ST89C52RC gesendet, der die Frequenz misst, die entsprechenden Werte für die Kapazität C_x oder die Induktivität L_x berechnet und sie auf dem LC-Display anzeigt.

Ein schwingender Komparator

Die Schaltung, die die Hälfte des Doppelkomparators U_2 verwendet, ist für die Aufrechterhaltung der Oszillation mit der Resonanzfrequenz des RC-Netzwerks verantwortlich. Beim Einschalten der Schaltung beträgt die Spannung an Pin 3 2,5 V, die durch den Teiler R_4/R_5 erzeugt wird. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch der Kondensator C_4 entladen (0 V). Die Ausgangsspannung von U_2A beträgt daher 5 V. Damit wird der Kondensator C_4 über den Widerstand R_6 geladen, bis die Spannung an Pin 2 gleich 2,5 V ist. An diesem Punkt geht der Ausgang von U_2A auf Low. Dies führt über den Widerstand R_7 dazu, dass die Spannung an Pin 3 sprunghaft auf etwa 1,7 V abfällt.

Dieser Impuls wird über C_3 in den LC-Schwingkreis eingekoppelt, so dass dieser mit seiner Eigenfrequenz resoniert. Diese Oszillation wird wiederum über C_3 an den nicht-invertierenden Eingang von U_2A gekoppelt, so dass am Ausgang von U_2A ein Rechtecksignal erscheint. Dieses Ausgangssignal hält über R_7 und C_3 die Oszillation aufrecht. Diese clevere Schaltung wurde 1998 von dem verstorbenen Neil Heckt für sein inzwischen nicht mehr erhältliches und viel kopiertes LC-Meter [2] vorgestellt.

Frequenzmessung

In dieser Betriebsart schwingt die LC-Schaltung nicht mehr, da der zweite Anschluss von L_1 potentialfrei bleibt. Stattdessen wird ein externes Signal, dessen Frequenz gemessen werden soll, über das Netzwerk $C_1/R_1/R_3$ eingespeist. An Pin 1 von U_2A wird ein Signal mit identischer Frequenz erzeugt, und der Mikrocontroller misst diese Frequenz und zeigt sie auf dem LC-Display an.

µF-Modus

Für polarisierte Kondensatoren wird ein völlig anderer Ansatz verwendet. Elektrolytkondensatoren eignen sich nicht wirklich für den Bau von Oszillatoren, da ihr Qualitätsfaktor zwischen 10 und 100 Mal niedriger ist als der von Keramik- oder Folienkondensatoren. Daher haben sich die Entwickler dieser Schaltung für eine einfache, lehrbuchmäßige Methode entschieden: Die Gleichstrommessung. Der Kondensator wird mit einer Festspannung (5 V) über einen Festwiderstand (2 kΩ oder 100 Ω, je nach Bereich) geladen. U_1 steuert den Beginn der Aufladung

über die Transistoren Q1 und Q2, die den positiven Pol des Kondensators mit Masse verbinden oder ihn schwebend lassen. Wenn Q2 von U1 ausgeschaltet wird, beginnt der Kondensator mit der Aufladung und U1 startet einen Timer. Wenn die Spannung an seinen Anschlüssen 63 % der Versorgungsspannung (VCC) erreicht, geht der Ausgang des Komparators U2B auf Low und signalisiert U1 damit, den Timer zu stoppen. Damit wird die Ladezeit bei konstanter Spannung bis zu 63 % der Versorgungsspannung gemessen. Per Definition ist diese Zeit gleich $\tau = R \times C_x$. Der Mikrocontroller berechnet $C_x = \tau / R$ und zeigt das Ergebnis an. Es stehen zwei Bereiche zur Verfügung (0 bis 1000 μF und $>1000 \mu\text{F}$), die mit dem Schalter SW3 ausgewählt werden. Das Mehrgang-Potentiometer RP1 dient zur Einstellung der 63 %-Schwelle und zur Feinabstimmung der Messung, wenn Sie einen Referenzkondensator besitzen.

Was könnte man verbessern?

Der HU-053 ist ein interessanter Bausatz: Er lässt sich leicht zusammenbauen, enthält eine hochwertige Leiterplatte und gut zugängliche Lötstellen. Mir gefällt die Tatsache, dass er modular aufgebaut ist: ein steckbares LCD, gesockelte ICs und ein Acrylgehäuse, das von Schrauben gehalten wird. Die Schaltung veranschaulicht sehr schön Konzepte wie die Umwandlung physikalischer Messungen in Zeit-/Frequenzmessungen, LC-Oszillatoren und Komparatoren mit positiver Rückkopplung. Weitere Informationen über die Verwendung von Komparatoren als Oszillatoren finden Sie beispielsweise in den Application Notes 41 und 74 des Linear Application Handbook [3]. Dies ist auch eine ausgezeichnete Gelegenheit, sich mögliche Verbesserungen vorzustellen. Hier sind einige Punkte, die als Ausgangspunkt für Ihre Ideen dienen können:

- Kondensatoren C5 und C6 durch geeignete, hochpräzise Referenz-Kondensatoren ersetzen.
- Entwurf einer kleinen Platine, um den Mikrocontroller durch einen Arduino zu ersetzen und ein Open-Source-Programm zu schreiben.
- Überarbeitung des Messalgorithmus. Gegenwärtig hängt die Induktivitätsmessung vom absoluten Wert der Induktivität der Spule L1 ab, und ihre Ungenauigkeit führt zu einem Messfehler. Durch eine Umstellung der Gleichungen 1 und 3 ist es jedoch möglich, L1 als Funktion von C5, C6 und F1 auszudrücken. Auf diese Weise kann der Mikrocontroller den genauen Wert von L1 berechnen, anstatt ihn als "magic number" im Programm zu behandeln. Diese Methode wird in den meisten Varianten dieses LC-Meters verwendet, beispielsweise in der

Mathematische Grundlagen

Wie werden C_x und L_x berechnet? Durch Umformung von Gleichung 1 können wir L1 als Funktion von F1, C5 und C6 schreiben. Ersetzt man dann L1 durch den Ausdruck in Gleichung 2, so ergibt sich $C_x = (C_5 + C_6)(F_1^2 / F_2^2 - 1)$. Wenn das HU-053 in Betrieb genommen wird, bevor ein zu messendes Bauteil eingefügt wurde, misst das Gerät die Frequenz F1. Wenn dann der zu messende Kondensator eingesetzt wird, misst das Gerät F2 und zeigt das Ergebnis für C_x an. Entsprechend kann durch Umformung von Gleichung 1 $C_5 + C_6$ als Funktion von F1 und L1 geschrieben werden. Ersetzt man dann $C_5 + C_6$ durch den Ausdruck in Gleichung 3, so ergibt sich L_x als $L_x = L_1(F_1^2 / F_3^2 - 1)$. Da der Wert von L1 im Voraus bekannt ist, misst das Gerät zunächst F1, dann F3 und zeigt schließlich das Ergebnis an. Beachten Sie, dass im pF-Modus die Taste SW3 gedrückt werden kann, um den Nullpunkt zu kalibrieren; dabei wird F1 gemessen und im Speicher abgelegt. Dieser Kalibrierungswert wird auch im μH -Modus verwendet.

Version von Jiri Recek [4]. Sie erlaubt die Verwendung einer beliebigen Induktivität mit beliebiger Toleranz, ohne die Genauigkeit zu beeinträchtigen. In allen Fällen ist jedoch die Genauigkeit des Kondensatorwerts immer noch ausschlaggebend für die Messgenauigkeit.

- Modifizierung des Programms, um die erste Zeile der Anzeige zu verwenden. Diese zeigt derzeit keine sehr nützlichen Informationen an.
- Hinzufügen eines Spannungsreglers und/oder eines Verpolungsschutzes, um mehr Flexibilität und Sicherheit in Bezug auf die Versorgungsspannung zu erreichen.
- Ermittlung von Widerstandswerten, um das Schaltschwelle des U2B-Komparators auf 63 % der Versorgungsspannung (VCC) zu setzen, ohne eine manuelle Einstellung vornehmen zu müssen.
- Reduzierung des Fehlers, der durch die Schwellenspannung V_{CE} von Q2 im μF -Modus entsteht.

Gegenwärtig beginnt die Aufladung des Kondensators nicht bei 0 V, sondern bei 0,2 V. Diese und die vorherigen Ideen sind als Übung für unsere Leser gedacht. Viel Erfolg! 

Übersetzung von Holger Neumann — 240374-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Senden Sie eine E-Mail an den Autor unter jean-francois.simon@elektor.com oder kontaktieren Sie Elektor unter redaktion@elektor.de.



Passende Produkte

- **LC-Meter Kit**
www.elektor.de/20868
- **DER EE DE-5000 LCR-Meter (100 kHz)**
www.elektor.de/20675

WEBLINKS

- [1] Bedienungsanleitung des Herstellers: <https://tinyurl.com/5hxcvxy3>
- [2] LC-Meter von Neil Heckt: <https://tinyurl.com/mv65tzc2>
- [3] Linear Applications Handbook: <https://tinyurl.com/2hfm2c>
- [4] LC-Meter von Jiri Recek: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/lc-metr-s-89c2051.html>