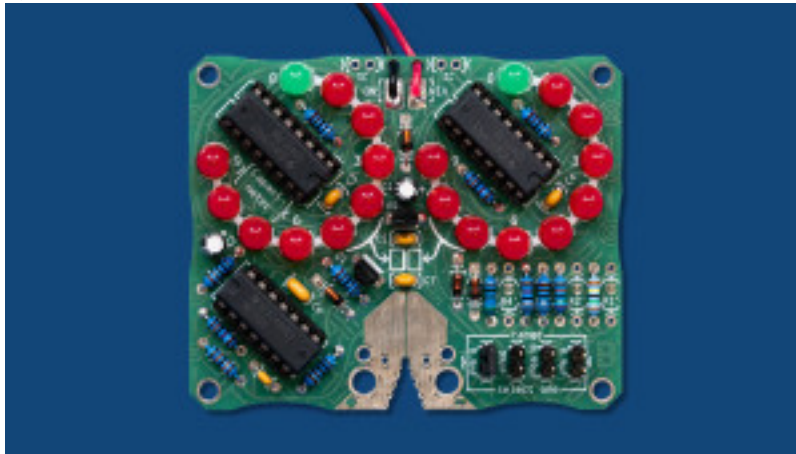


Capaci-Meter

16. Januar 2020, 00:00 Uhr



Capaci-Meter

Von Jez Siddons und Saar Drimer

Mit nur zwei Ziffern auf dem Display kann das Gerät natürlich nicht als Präzisions-Messgerät konzipiert sein. Stattdessen soll es lediglich anzeigen, ob die Kapazität eines Kondensators nahe des aufgedruckten oder gewünschten Sollwerts liegt. Dies kann bei nicht gerade eng tolerierten Kondensatoren nützlich sein, aber auch, wenn es schwierig ist, die auf dem Bauteil gedruckten Werte abzulesen.

Messbereich und Genauigkeit

Das Messgerät verfügt über vier Messbereiche (**Tabelle 1**). Die minimale Kapazität für jeden Bereich wird durch die Zählerauflösung (sowie Jitter) festgelegt, so dass das Minimum typischerweise doppelt so hoch ist wie die Messauflösung. Wie bei jedem Messgerät ist es gut, einen Messbereich so zu wählen, dass der voraussichtliche Messwert dem maximalen Skalenendwert (Vollausschlag) so nahe wie möglich kommt, aber nicht darüber liegt.

Eigenschaften

- Minimal messbare Kapazität: 200 pF
- Maximal messbare Kapazität: 9,9 μ F
- Leerlaufprüfspannung: 3,3 V
- Maximal zulässige Spannung an den Prüfspitzen: -0,6 V bis +5,6 V
- Eingangsimpedanz: 130 k Ω
- Fehler (unangepasst): $\pm 5\%$ Vollausschlag
- Fehler (mit Feinkalibrierung der Messwiderstände): $\pm 2\%$ Vollausschlag
- Stromaufnahme: 15 mA
- Betriebsspannung: 7,5...15 V_{DC}

Tabelle 1. Das Kapazitäts-Messgerät bietet vier Messbereiche.

Wenn eine Kapazität für den aktuell gewählten Bereich zu groß ist, stoppt die Anzeige bei „99“. Testen Sie im nächsthöheren Bereich, ob die Kapazität wirklich überschritten wurde oder ob sie sich vielleicht exakt bei „99“ befindet.

Bereich	Minimale Kapazität	Maximale Kapazität	Auflösung
1	0,2 nF (200 pF)	9,9 nF	0,1 nF (100 pF)
2	2 nF	99 nF	1 nF
3	0,02 μ F (20 nF)	0,99 μ F (990 nF)	0,01 μ F (10 nF)
4	0,2 μ F (200 nF)	9,9 μ F	0,1 μ F (100 nF)

Die typischen Fehler der vier Messbereiche liegen in der Größenordnung von $\pm 5\%$, können aber durch eng tolerierte Widerstände weiter verringert werden. Allerdings kann eine zweistellige Anzeige auch theoretisch nur einen maximalen Fehler von $\pm 1\%$ des Skalenendwerts liefern. Darüber hinaus können Messquantisierung und Jitter einen zusätzlichen Fehler von ± 1 Digit hinzufügen. Von daher können Sie, realistisch gesehen, einen minimalen Fehler von $\pm 2\%$ über den gesamten Messbereich erreichen, wenn alle vier Bereiche genau abgestimmt sind.

Wie eine Dekatron-Zählröhre

Zwei Kreise mit je zehn LEDs bilden die zweistellige Anzeige des Capaci-Messgeräts. Diese Kreise erinnern an Dekatrons, Zählröhren, die viel früher als Halbleiterchips, LEDs und sogar Transistoren für Zähler/Displays verwendet wurden. Im Gegensatz zu den originalen Dekatrons sind die LEDs hier angeordnet wie Stunden auf einer Uhr, so dass die Anzeige intuitiv abgelesen werden kann (**Bild 1** und **Bild 2**).

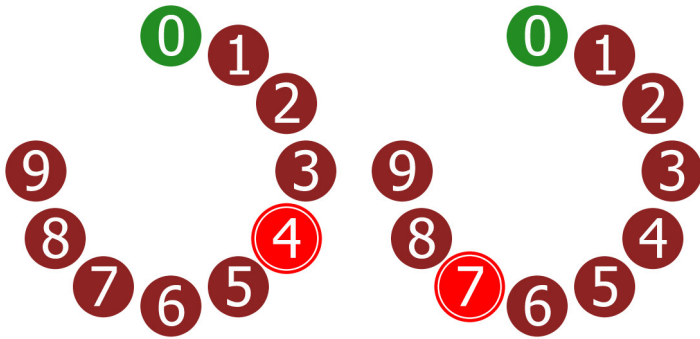


Bild 1. Hier wird der Wert von „47“ angezeigt. Dies entspricht im aktuell gewählten Messbereich 0,0...9,9 μF bei einer Kapazität von 4,7 μF .

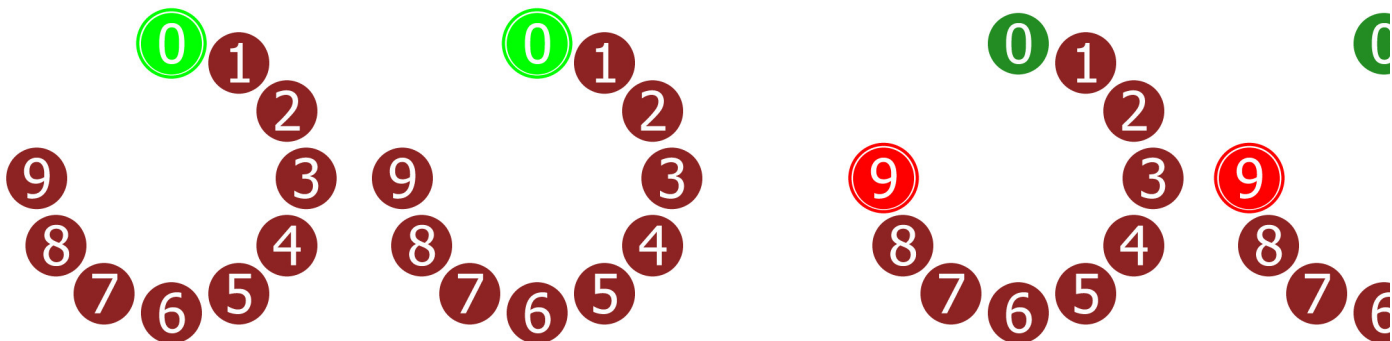


Bild 2. Die Anzeige zeigt „00“ (links) und „99“ (rechts). „99“ kann bedeuten, dass der gemessene Wert exakt das Maximum der Anzeige erreicht oder möglicherweise darüber liegt.

Jitter

Manchmal kann, wie in **Bild 3** zu sehen, die Anzeige zwischen zwei Werten schwanken, wenn die Kapazität an der Grenze zwischen zwei Messauflösungen liegt oder wenn elektrisches Rauschen die Messtätigkeit stört. In den meisten Fällen ist es leicht zu erkennen, welcher der beiden Werte der „richtige“ ist, aber das Ganze kann schwieriger zu interpretieren sein, wenn die Zahlen zwischen 9 und 0 wechseln und auch die Zehnerstelle hin und her springt.

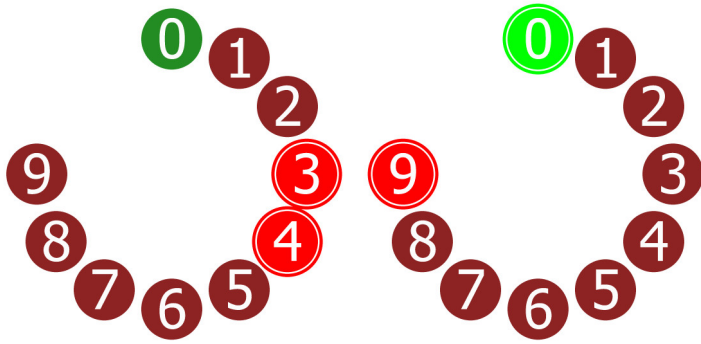


Bild 3. Die Anzeige wechselt zwischen „39“ und „40“. Das kann zunächst verwirren, man könnte auch glauben, sie pendle zwischen „30“ und „49“. Natürlich tritt aber ein solcher Effekt nur zwischen benachbarten Werten (wie 39 und 40) auf.

Das Messprinzip

Das Capaci-Meter misst fortwährend die Zeit, die der Capacitor-
under-Test (Cx) benötigt, um sich über einen bekannten
Widerstand zu einer bestimmten Spannung aufzuladen. Die
Schaltung besteht aus drei Hauptteilen:

- Cx-Takt (wobei Cx der zu testende Kondensator ist): ein simpler 555-basierter astabiler Multivibrator (U3A, die Hälfte eines 556-Doppeltimers). Die Dauer der Impulse ist proportional zur Kapazität Cx.
- Haupttaktgeber: ein Rechtecksignal, das vom Zähler zur Zeitmessung verwendet wird. Durch die Änderung der Frequenz des Rechtecks lässt sich der effektive Messbereich des gesamten Messgeräts ändern.
- Zähler/Anzeige: Zählt die steigenden Flanken des Haupttakts und misst so die Zeit. Die Zähler treiben auch die LEDs der Anzeige.

Der Haupttakt erzeugt Impulse für die Zähler/Display-Abteilung. Ist das Cx-Signal high, zählt der Zähler die Impulse des Haupttakts, ist es low, so ist der Haupttakt deaktiviert (**Bild 4**) und der Zähler stoppt. Gleichzeitig werden die LEDs eingeschaltet, so dass der gezählte Wert angezeigt wird.

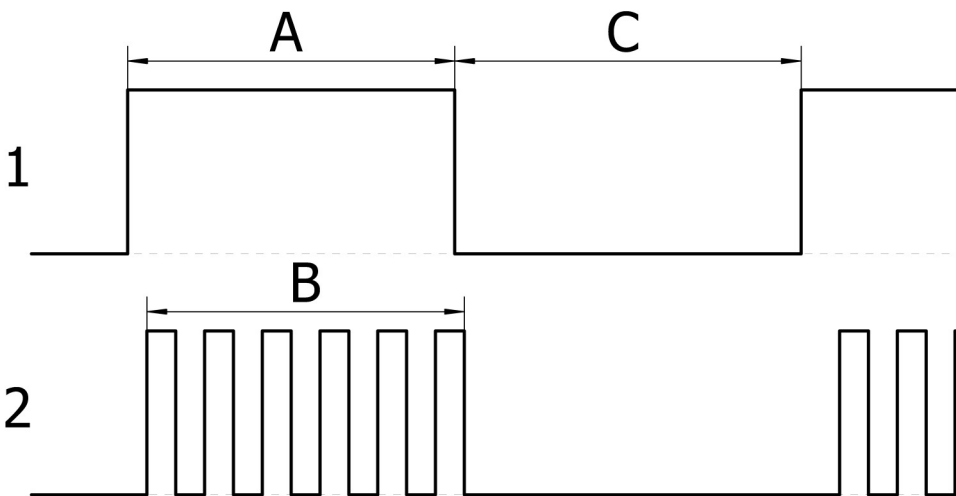


Bild 4. Die Dauer von (A) hängt vom Wert von C_x ab. Der Zähler zählt die Impulse des Haupttakts (2) nur, wenn das C_x -Signal (1) high ist (B). Wenn es low ist, wird der Messwert angezeigt (C).

Start der Zählung bei null

Damit der Zähler bei jedem Zählbeginn bei Null beginnt, muss er bei der steigenden Flanke des C_x -Taktsignals zurückgesetzt werden. Dies wird von einem einfachen Differenzierglied ($R12/C8$) erledigt, das sehr schmale Impulse bei jeder Flanke des Rechtecksignals liefert (**Bild 5**). Das Differenzierglied erzeugt auch negative Spannungen, die die Zähler nicht verarbeiten können. Diode $D4$ entfernt diese negativen Impulse, bevor sie den Zähler-ICs schaden können. Die vollständige Schaltung des Messgeräts ist in **Bild 6** zu sehen.

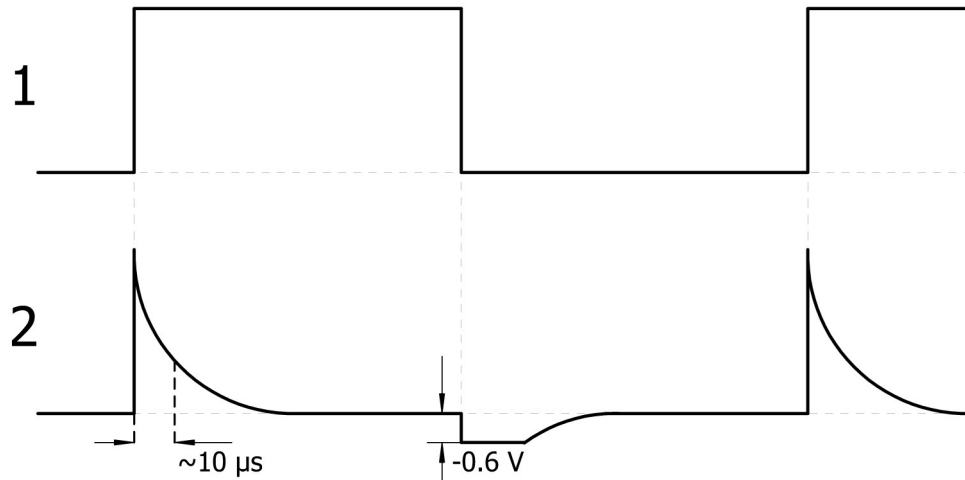


Bild 5. (1) ist der Cx-Takt, (2) ist das Rückstellsignal für die Zähler. Der Differenzierer R12/C8 erzeugt bei einer steigenden Flanke an seinem Eingang einen positiven Impuls und einen negativen Impuls, wenn er eine fallende Flanke wahrnimmt. D4 klemmt den negativen Impuls auf etwa -0,6 V, um eine Beschädigung der Zähler-ICs zu vermeiden. Die Werte von R12 und C8 bestimmen die Ausschwingrate (decay) des differenzierten Signals. Hier haben wir Werte gewählt, die in 10 μs ein Ausschwingen von etwa 66% ergeben, einfach bestimmt durch $T = R \times C$.

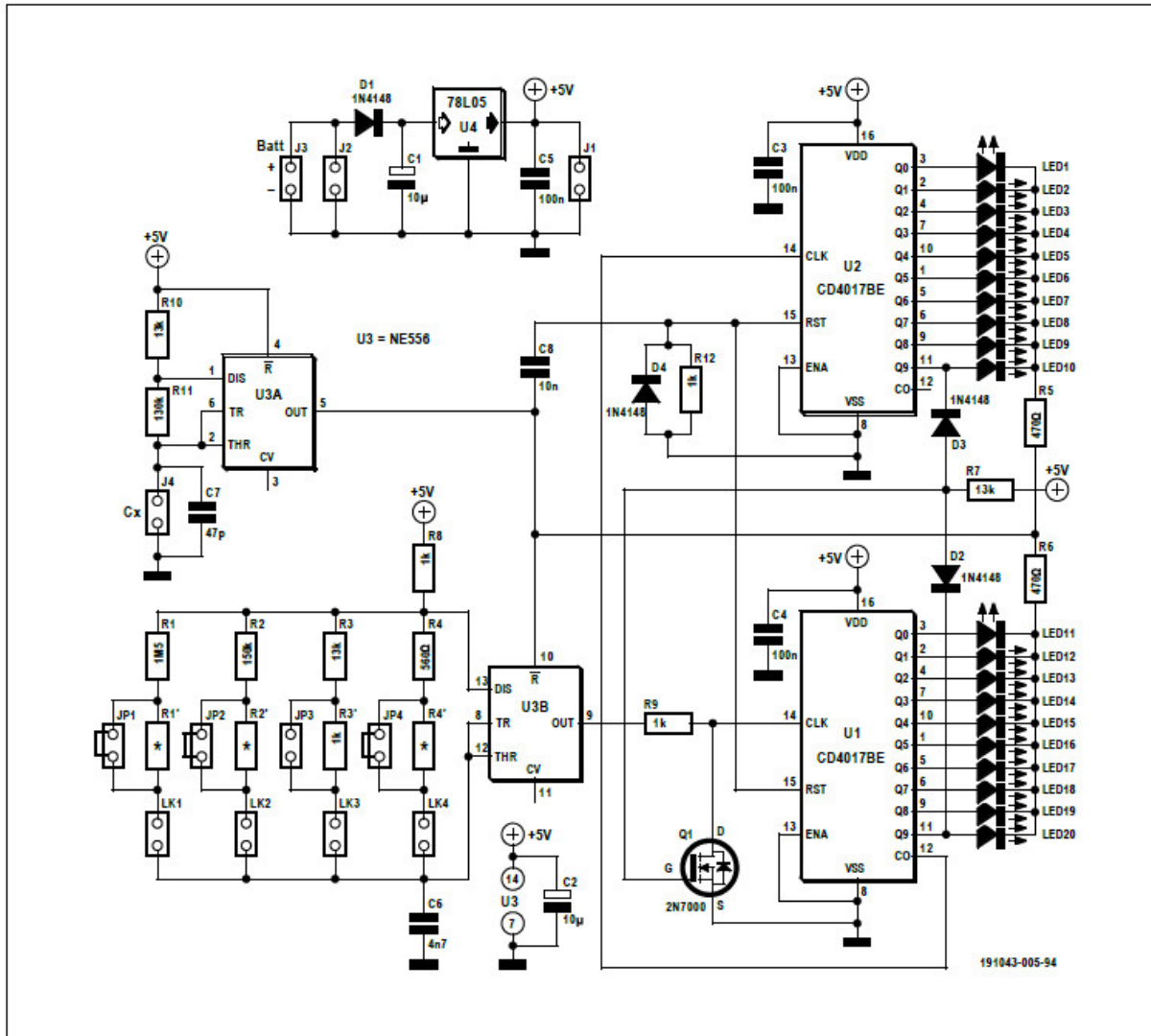


Bild 6. Die vollständige Schaltung des Capaci-Messgeräts.

Überlauf verhindern

Obwohl nicht unbedingt notwendig, ist der Zähler auf 99 begrenzt, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, wenn die Anzeige 99 überschreitet und wieder bei 00 beginnt. Deshalb wird die Zählung beendet, wenn die Einser UND die Zehner „9“ sind.

Logischerweise benötigen wir dafür ein UND-Gatter, das hier, da nur ein einziges Gatter benötigt wird, aus zwei Dioden (D2, D3 mit R7 als Pull-up) und MOSFET Q1 besteht. Wenn die „9er-Ausgänge“ beider Dezimalzähler high sind, wird der Haupttakt von Q1 unterbrochen, um ein Weiterzählen zu verhindern.

Haupttakt-Frequenzen

Wir möchten, dass der Zähler für eine Kapazität bis 99 zählt, die den aktuellen Bereich vollständig abdeckt. Zum Beispiel: Wenn wir einen Kondensator von 9,9 μF im höchsten Bereich testen, wollen wir, dass der Zähler genau 99 erreicht. In unserer Schaltung wird die Dauer der High-Phase des Cx-Takts durch die Werte von R10, R11 und Cx bestimmt:

$$T_{\text{HIGH}} = 0,693 \times (R10 + R11) \times Cx \text{ [s]}$$

Mit den angegebenen Werten für R10 und R11 und 9,9 μF für Cx ergibt sich eine Dauer der High-Phase von 0,981 s. Während dieser Zeit wollen wir 99 Impulse des Haupttakts zählen. Die Frequenz des Haupttakts sollte also:

$$f_{\text{CLOCK}} = 99 / 0,981 = 100,9 \text{ Hz}$$

sein. Das ist die Frequenz, die für den Bereich 9,9 μF benötigt wird. Wenn wir den Kapazitätsbereich um den Faktor 10 reduzieren (Vollausschlag 0,99 μF) und wir immer noch bis 99 zählen wollen, dann muss die Haupttakt-Frequenz natürlich um den Faktor 10 höher sein. Gleiches gilt für die noch niedrigeren Bereiche.

Diese Frequenzen für jeden Bereich sind theoretisch; in der Praxis können sie aufgrund von Bauteiltoleranzen leicht abweichen. Um den Fehler zu verringern, können die Messbereichswiderstände durch Hinzuschalten weiterer Widerstände (R1-R1', R2-R2', R3-R3' und R4-R4') fein justiert werden. Doch selbst ohne Anpassungen liegt der Fehler wahrscheinlich innerhalb von $\pm 5\%$ Vollausschlag, möglicherweise ist er sogar kleiner.

Messen Sie an Pin 9 von U3 die Haupttakt-Frequenz bei kurzgeschlossenen Kondensator-Messleitungen. Beachten Sie, dass die Pads für die Zusatzwiderstände R1', R2' und R4' (R3' nicht!) auf der Platine kurzgeschlossen sind. Wollen Sie einen Zusatzwiderstand bestücken, müssen Sie deshalb die entsprechende Leiterbahn auftrennen.

Abweichung vom theoretischen Wert

Um alle vier Messbereiche abzudecken, muss der Haupttakt Frequenzen von etwa 100 Hz bis 100 kHz erzeugen. Laut

Datenblatt wird die Frequenz des 555 wie folgt berechnet:

$$f = 1,44 / (C6 \times (R8 + 2 \times Rx)) \text{ [Hz]}$$

Hier ist Rx entweder $R1 + R1'$, $R2 + R2'$, $R3 + R3'$ oder $R4 + R4'$.

Bei höheren Frequenzen weicht die tatsächliche Ausgangsfrequenz leider vom theoretischen Wert ab. Diese Abweichung wurde bei der Auswahl der bereichsbestimmenden Widerstände zwar schon berücksichtigt, eine weitere Feinabstimmung kann jedoch nicht schaden.

Montage des Kapazitäts-Messgeräts

Wie üblich beginnen wir mit der Montage der kleinen Bauteile wie Dioden und Widerstände und arbeiten uns dann zu den größeren Bauteilen vor. Beachten Sie, dass $R1'$, $R2'$ und $R4'$ (zunächst) nicht montiert werden sollten, $R3'$ hingegen schon. Achten Sie darauf, dass alle gepolten Bauteile (in diesem Projekt alles außer den Widerständen, den Keramikkondensatoren und den Stiftheisten) korrekt ausgerichtet sind. Die Verwendung von IC-Fassungen für U1, U2 und U3 wird dringend empfohlen. Führen Sie die Batteriekabel durch zwei der Platinenbohrungen, bevor Sie sie an die Pads löten.

Achtung Test


Überprüfen Sie zunächst noch einmal, ob die gesamte Platine korrekt bestückt wurde und ob es keine Kurzschlüsse gibt.

Überprüfen Sie auch, ob die ICs richtig herum eingesetzt sind und alle Beinchen in ihren Schuhen stecken.

Stecken Sie einen Jumper auf einen der Header zur Bereichsauswahl. Befestigen Sie eine 9-V-Batterie an der Batterieklemme. Nun sollten die grünen LEDs leuchten, eventuell eine rote LED im rechten LED-Kreis. Nehmen Sie einen Kondensator mit einem bekannten Wert, der sicher in einem der vier Messbereiche liegt, zum Beispiel 47 nF für den 99-nF-Bereich. Bringen Sie den Testkondensator an den beiden Testpads an oder verwenden Sie, wenn Sie möchten, Messleitungen (die Bohrungen in den Testpads sind für 2-mm- und 4-mm-Bananenstecker geeignet). Der Wert des Kondensators

sollte auf der Anzeige erscheinen. Wenn dies nicht der Fall ist, überprüfen Sie den ausgewählten Bereich und eventuell begutachten Sie nochmals Ihre Lötarbeiten.

Eine letzte Anmerkung, der Vollständigkeit halber: Das Capacimessgerät kann entweder mit einer 9-V-Blockbatterie an J3 oder einer externen 7...15-VDC-Spannungsquelle an J2 betrieben werden. Schließen Sie jedoch nicht beide gleichzeitig an! J1 ist nur ein Testpad, schließen Sie hier keine Stromversorgung an!



STÜCKLISTE

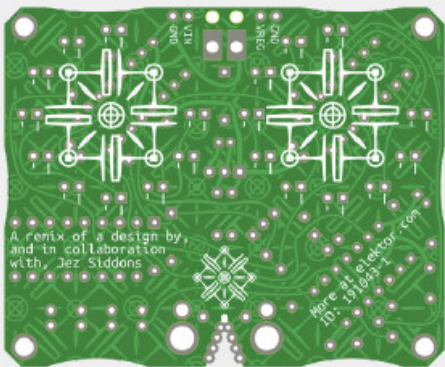
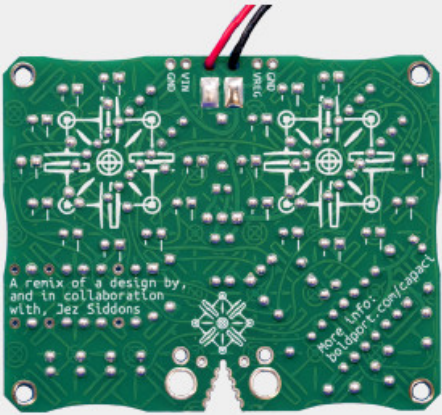
Widerstände
 (alle 1%, 0,25 W)
 R1 = 1M5
 R2 = 150 k
 R3,R7,R10 = 13 k
 R3',R8,R9,R9,R12 = 1 k
 R4 = 560 Ω
 R5,R6 = 470 Ω
 R11 = 130 k
 R1',R2',R4' = optional zur Feinkalibrierung

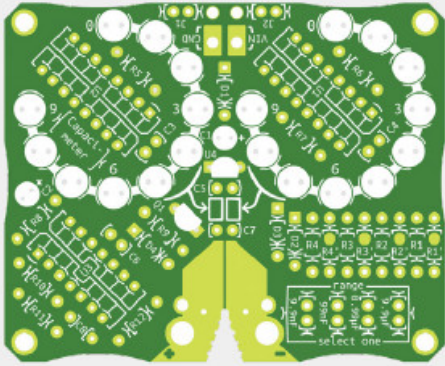
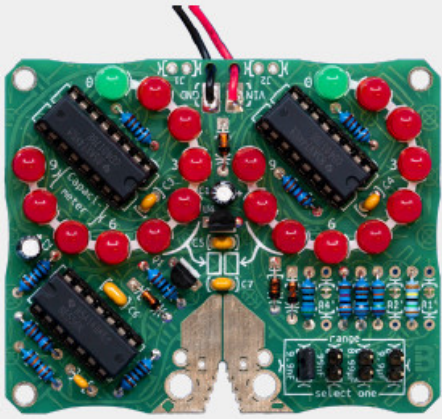
Kondensatoren
 C1,C2 = 10 μ, 10 V
 C3,C4,C5 = 100 n
 C6 = 4n7, 1% oder 5%
 C7 = 47 p
 C8 = 10 n

Halbleiter
 D1,D2,D3,D3,D4 = 1N4148
 Q1 = 2N7000 (BS170)
 U1,U2 = CD4017BE
 U3 = NE555
 U4 = 78L05
 LED1,LED11 = LED, grün, 5 mm, low current oder high brightness
 LED2...LED10, LED12... LED20 = LED, rot, 5 mm, low current oder high brightness

Außerdem
 J1,J2,LK1,LK2,LK3,LK4 = 2-polige Stiftleiste, Raster 2,54 mm
 J3 = Clip für 9-V-Block
 J4 = Messkabel zum Testkondensator

JP1 = Jumper zur Bereichswahl
 2 St. 2x8-polige DIL-Fassung für U1, U2
 1 St. 2x7-polige DIL-Fassung für U3
 Platine 191043-1

Abschließend

Ich möchte Stephen Bernhoeft für sein kritisches Auge, seinen Rat und seine Klarheit bei der Verfeinerung und Prüfung dieser Schaltung danken. Vielen Dank auch an Saar Drimer von Boldport

für den Entwurf der Platine. Ich hoffe, dass Ihnen der Bau dieses Geräts genauso viel Spaß macht wie mir und dass es seine Messaufgaben brav erfüllt!