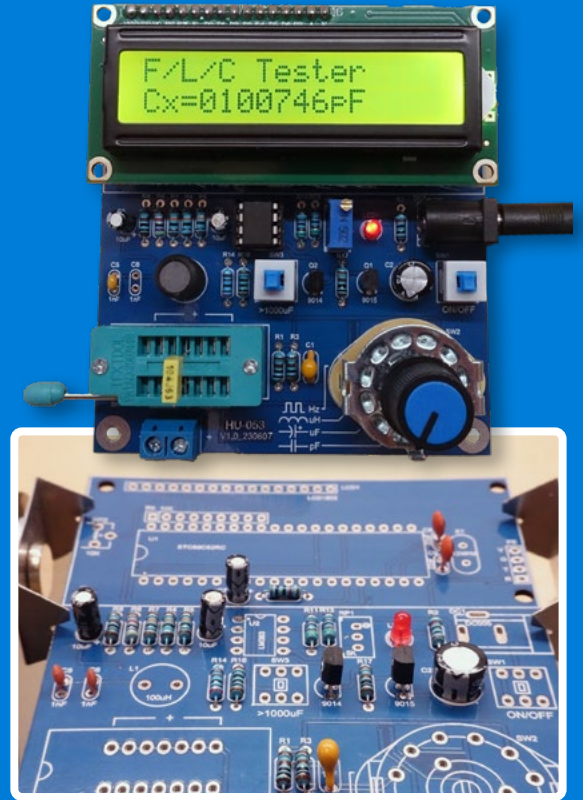
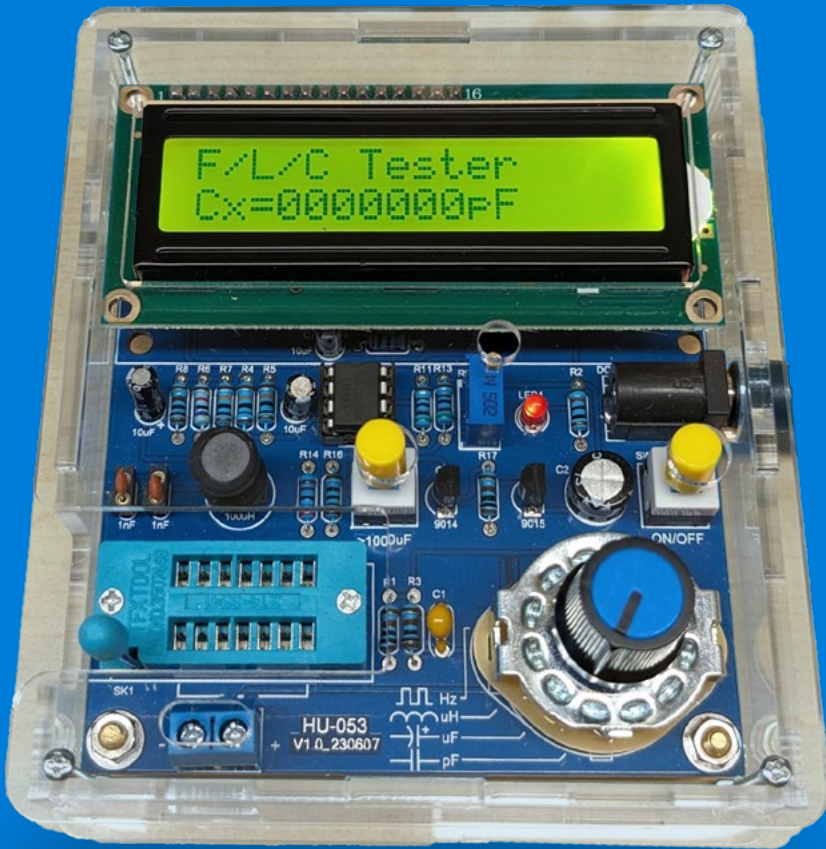


REVERSE ENGINEERING VAN EEN LC-METER-KIT

en enkele verbeteringen

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



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



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



MELD JE AAN

www.elektormagazine.nl/elektor-newsletter

Reverse Engineering van een LC-meter-kit en enkele verbeteringen

Jean-François Simon (Elektor)

De HU-053 is een goedkope en leuke kit die online verkrijgbaar is. Hij heeft eenvoudig te solderen through-hole componenten en een transparante acryl behuizing. De HU-053 meet capaciteit, inductie en frequentie, waardoor het een leuk projectje is voor een regenachtige zondagmiddag. We laten hier 'reverse engineering' op deze kit los en onderzoeken hoe het werkt, hoe goed hij presteert en welke verbeteringen er mogelijk zijn.



Figuur 1. De HU-053 LC-meter.

De HU-053 kit bestaat uit een dubbelzijdige print, ongeveer veertig componenten en een set van zes voorgesneden transparante acrylplaatjes, plus alle benodigde schroeven en moeren voor de montage. Het resultaat is het kleine apparaatje in **figuur 1**, met afmetingen van 91×106 mm en een hoogte van 28 mm. De meest herkenbare onderdelen zijn natuurlijk het klassieke LCD met twee regels van 16 tekens, de microcontroller STC89C52RC in zijn grote DIP-40 behuizing, een driepolige schakelaar met vier standen (3P4T) voor de functieselectie en een zero-insertion-force voetje (ZIF) voor het aansluiten van de te testen componenten. Het apparaat wordt gevoed door een 5V-voeding, bijvoorbeeld een telefoonlader. Een USB/DC-kabel met een 5,5 mm-connector wordt meegeleverd.

Functies en bereiken

De vier functies van het apparaat zijn het meten van capaciteit van kleine niet-gepolariseerde condensatoren (1 pF tot 2200 pF), capaciteit van elektrolytische condensatoren (1 μ F tot 12000 μ F), inductantie (1 μ H tot 1 H) en frequentie (20 Hz tot 400 kHz). De bereiken die hier worden getoond zijn de bereiken die worden aangegeven op de productpagina van de fabrikant, maar het lijkt erop dat het eerste bereik in werkelijkheid veel groter is. Ik heb zonder

problemen capaciteiten kunnen meten van meer dan 1 μ F met deze functie. Waarschijnlijk is het een tikfout bij de meeteenheid die nooit is gecorrigeerd. Ik heb de andere bereiken niet gecontroleerd, omdat ik geen condensatoren en spoelen bij de hand had die groot genoeg waren. Desalniettemin blijkt de meetnauwkeurigheid, zoals we later zullen zien, soms aan de matige kant. Dit apparaat is meer een leuk bedoelde educatieve kit over meettechnieken en oscillatoren dan een echt meetinstrument. Als u al een LC(R)-meter hebt, kunt u zich vermaken met het vergelijken van de metingen van de HU-053 met die van uw eigen apparaat.

Montage

De montage is eenvoudig aan de hand van de geïllustreerde bouwbeschrijving. Zoals gebruikelijk is de vertaling van de fabrikant van Chinees naar Engels niet perfect, maar de afbeeldingen zijn behulpzaam. Er is ook een online-handleiding beschikbaar op [1]. Begin met het solderen van de kleinste componenten (**figuur 2**) zoals de weerstanden, en installeer de componenten in volgorde van toenemende grootte. De kit bevat per waarde één weerstand teveel, wat een beetje misleidend is, maar niets om u zorgen over te maken. Inspecteer de soldeer-

verbindingen met een vergrootglas voordat u de voeding inschakelt. Zorg ervoor dat de gebruikte voeding 5 V levert, want er zit geen spanningsregelaar op de print; een hogereingangsspanning zal de microcontroller om zeep helpen. Stel de potentiometer RP2 af om het juiste contrast op het display te krijgen. Regel tenslotte potentiometer RP1 bij tot u een spanning van 3,16 V op pin 5 van comparator U2 meet.

“Houston, we have a problem”

Tijdens de eerste tests bleek het lage condensatorbereik een aanzienlijke meetfout te vertonen alhoewel het apparaat gekalibreerd was door knop SW3-knop ingedrukt te houden tot *Complete* op het display verschijnt en de knop dan los te laten. Het apparaat heeft meetafwijkingen van meer dan 30% vergeleken met mijn trouwe DE-5000. Het geeft bijvoorbeeld een condensator van 100 pF weer als 64 pF, 1 nF als 650 pF, 100 nF als 73 nF enzovoort (**figuur 3**). Wat is er hier aan de hand?

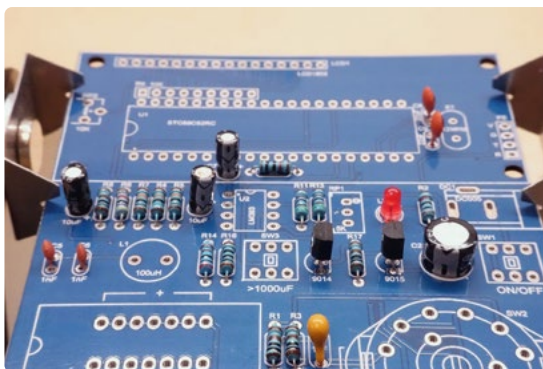
Probleem opgelost!

Later meer hierover, maar voor nu is hier een snelle oplossing. De condensatoren C5 en C6, twee keramische condensatoren van elk 1 nF, zijn parallel geschakeld als referentie voor de meting. Dat zijn dus de eerste verdachten. Hun waarde is nagemeten met een DE-5000 LCR-meter en het resultaat is te zien in **figuur 4**. Het blijkt dat ze veel groter zijn dan 1 nF; de ene is 1,5 nF en de andere bijna 1,8 nF. Dit zijn waarschijnlijk erg goedkope condensatoren met tolerantieklasse Z (-20% tot +80%). Het kunnen ook afgekeurde exemplaren zijn uit andere tolerantieklassen die opnieuw gelabeld zijn. Bovendien is hun dielektricum erg gevoelig voor temperatuurvariaties; u kunt de waarde zien verschuiven als u de component tussen uw vingers houdt. Dit alles maakt ze slechte kandidaten voor referentiecondensatoren. Helaas besteden de fabrikanten van deze kits hier niet al te veel aandacht aan. Nadat ik deze twee had vervangen door een enkele condensator van 2 nF (C0G, 5%, van Kemet) werd de meter bruikbaar, zie **figuur 5** waar een 100 nF condensator wordt gemeten. De C0G-klasse zorgt voor een veel betere temperatuur- en frequentiestabiliteit. Natuurlijk zou het nog beter kunnen door een tolerantie van 1% of nog beter te kiezen, maar die had ik niet bij de hand. Deze condensator is voorlopig voldoende.

Hoe werkt de meter?

We hebben het schema in **figuur 6** afgedrukt. Er is een LC-parallelkring opgebouwd met behulp van de referentiespoel L1 en de referentiecondensatoren C5 en C6 (deze staan parallel, zodat ze als één condensator werken). Zoals alle LC-kringen kan ook deze kring oscilleren en voor zijn resonantiefrequentie geldt:

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



Figuur 2. Begin met de kleinste onderdelen.



Figuur 3. Dezelfde component met twee meters gemeten – hier klopt iets niet!



Figuur 4. Deze twee referentiecondensatoren van 1 nF zijn niet de beste.



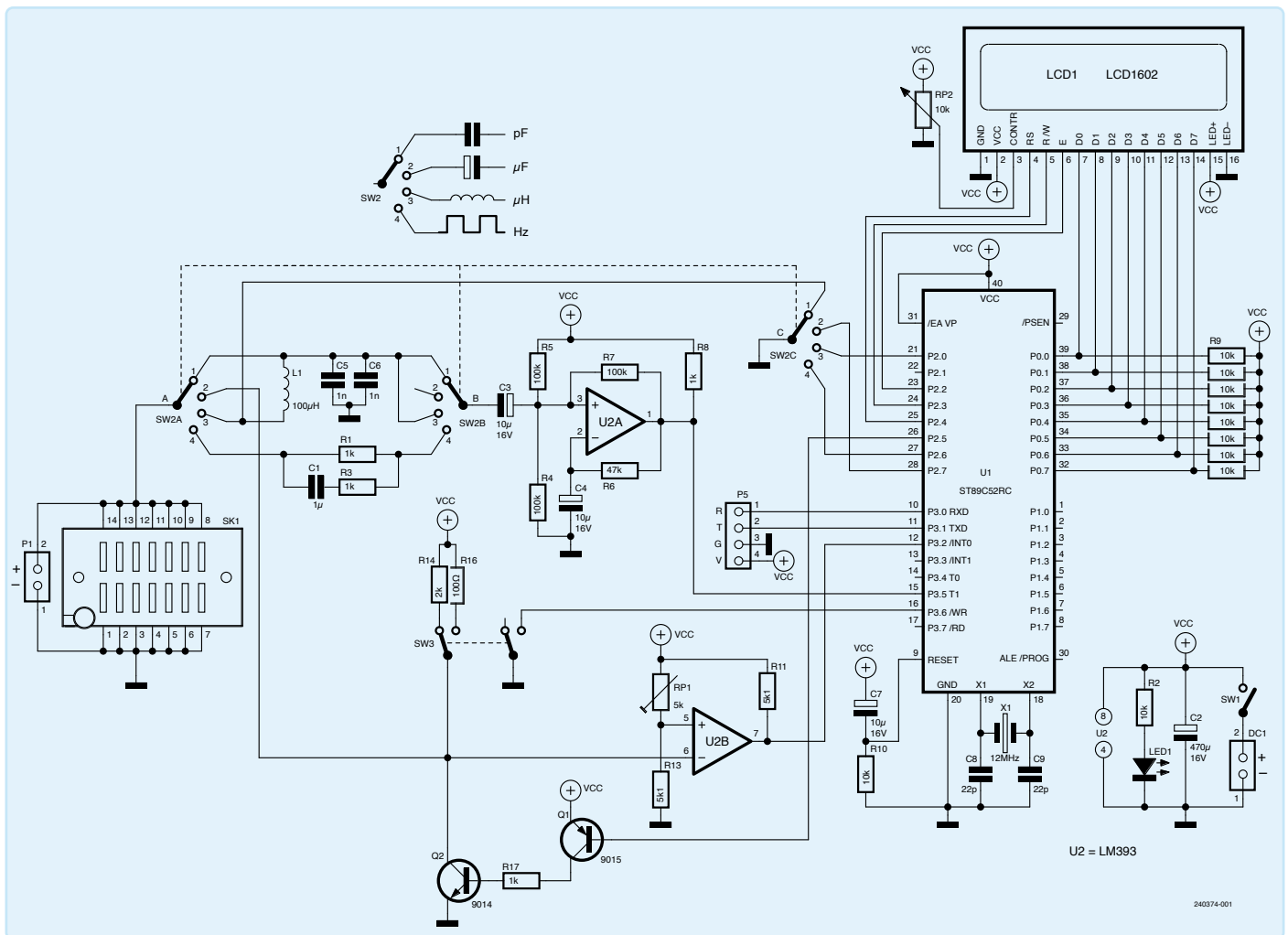
Figuur 5. Met een nieuwe referentiecondensator is het apparaat bruikbaar.

De contacten van draaischakelaar SW2 worden gebruikt om deze referentie-LC-schakeling aan te passen:

- > in de *pF*-modus staat de te meten condensator C_x parallel aan referentiecondensatoren C₅ en C₆. De oscillatiefrequentie verandert en wordt:

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

- > in de *μH*-modus wordt de te meten inductie L_x in serie geschakeld met de referentiespoel L1. De frequentie verandert als volgt:



▲
Figuur 6. Het schema.

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

Omdat de waarden van L1, C5 en C6 bekend zijn, is het voldoende om de frequenties F1, F2 of F3 te meten om de waarden van Cx of Lx te berekenen. De schakeling die wordt gevormd door de eerste helft van comparator U2 (een LM393), is verantwoordelijk voor het handhaven van de oscillaties bij de resonantiefrequentie en voor het produceren van een blokvolgsignaal van dezelfde frequentie op de uitgang. Dit signaal wordt naar de microcontroller gestuurd, die de frequentie meet, de bijbehorende capaciteit Cx of inductantie Lx berekent en weergeeft op het LCD.

Een oscillerende comparator

De schakeling rond de eerste helft van comparator U2 is verantwoordelijk voor het in stand houden van de oscillatie op de eigenfrequentie van het RC-netwerk. Wanneer de schakeling wordt ingeschakeld, bedraagt de spanning op pin 3 2,5 V, vanwege de R4/R5-spanningsdeler. Op dat moment is condensator C4 echter ontladen (0 V). De uitgangsspanning van U2A is daarom 5 V. Deze laadt condensator C4 op via weerstand R6 totdat de spanning op pin 2 gelijk is aan 2,5 V.

Nu wordt de uitgang van U2A laag. Dit veroorzaakt, via weerstand R7, een scherpe afname van de spanning op pin 3 tot ongeveer 1,7 V. Deze piek wordt via C3 ingekoppeld in de LC-kring, waardoor deze gaat resoneren op zijn

eigenfrequentie. Deze oscillatie wordt op zijn beurt weer via C3 gekoppeld naar de niet-inverterende ingang van U2A, waardoor een blokvolg verschijnt op de uitgang van U2A. Dit uitgangssignaal houdt via R7 en C3 de oscillatie in stand. Deze slimme schakeling werd in 1998 geïntroduceerd door wijlen Neil Heckt in zijn inmiddels niet meer verkrijgbare maar veel gekopieerde LC-meter [2].

Frequentiemeting

In deze stand oscilleert de LC-kring niet meer, omdat de tweede aansluiting van L1 zweeft. In plaats daarvan wordt een extern signaal, waarvan de frequentie gemeten moet worden, geïnjecteerd via het C1/R1/R3-netwerk. Een signaal met dezelfde frequentie wordt op pen 1 van U2A gegenereerd en de microcontroller meet deze frequentie en geeft deze weer op het LCD.

µF-stand

Voor gepolariseerde condensatoren wordt een andere methode gebruikt. Elektrolytische condensatoren zijn niet echt geschikt voor gebruik in oscillatoren, omdat hun kwaliteitsfactor zo'n 10 tot 100 keer kleiner is dan die van keramische of filmcondensatoren. Daarom kozen de ontwerpers van deze schakeling voor een eenvoudige methode volgens het boekje: gelijkstroommeting.

De condensator wordt opgeladen met een vaste spanning (5 V) via een vaste weerstand (2 kΩ of 100 Ω, afhankelijk van het bereik). U1 start met ontladen van de condensator

via transistoren Q1 en Q2, die de positieve pool met massa verbinden. Wanneer Q2 door U1 wordt afgeschakeld, begint de condensator op te laden en wordt door U1 een timer gestart. Wanneer de spanning op de aansluitingen 63% van V_{cc} bereikt, wordt de uitgang van comparator U2B laag, wat een signaal is voor U1, die de timer stopt. Zo wordt de laadtijd bij constante spanning tot 63% van de voedingsspanning gemeten. Per definitie is deze tijd gelijk aan $\tau = R \times C_x$. De microcontroller berekent $C_x = \tau/R$ en geeft het resultaat weer. Er zijn twee bereiken beschikbaar (0..1000 μF en >1000 μF), te kiezen met schakelaar SW3. De meerslagen-potmeter RP1 wordt gebruikt om de 63% verhouding in te stellen en om de meting te verfijnen als u over een referentiecondensator beschikt.

En verder

De HU-053 is een interessante kit. Hij is eenvoudig te bouwen, met een print van goede kwaliteit (gemaakt van FR-4 epoxy) en gemakkelijk bereikbare soldeereilandjes. Ik vind het leuk dat alles modulair is: plug-in LCD, de IC's worden in voetjes geplaatst en de acryl-behuizing wordt met schroeven en moeren gemonteerd. Het illustreert concepten zoals het omzetten van fysieke grootheden naar tijd/frequentie-metingen, en LC-oscillatoren en comparatoren met positieve feedback. Voor meer informatie over het gebruik van comparatoren als oscillatoren wordt verwezen naar bijvoorbeeld de Application Notes 41 en 74 uit het Linear Application Handbook [3]. Het is ook interessant om na te denken over mogelijke verbeteringen. Hier is een (onvolledige) lijst, dus aarzel niet om zelf verder te denken.


- > Vervang condensatoren C5 en C6 door goede, nauwkeurige referentiecondensatoren.
- > Ontwerp een klein printje om de microcontroller te vervangen door eentje die met Arduino gebruikt kan worden en schrijf een nieuw (open-source) programma.
- > Herzie het meetalgoritme. Op dit moment is de inductantiemeting afhankelijk van de zelfinductie van spoel L1 en de onnauwkeurigheid daarvan levert een meetfout op. Door de vergelijkingen 1 en 3 echter op een andere manier te gebruiken, is het mogelijk om L1 uit te drukken als functie van C5, C6 en F1. Hierdoor kan de microcontroller de precieze waarde van L1 berekenen, in plaats van die te behandelen als een 'van hogerhand gegeven' waarde in het programma. Deze techniek wordt gebruikt in de meeste varianten van deze LC-meter, zoals de

Een beetje wiskunde

Hoe worden C_x en L_x berekend? Door vergelijking 1 te herschrijven, kunnen we L1 uitdrukken als een functie van F1, C5 en C6. Door dan L1 te vervangen door de formule van vergelijking 2, kunnen we laten zien dat $C_x = (C_5 + C_6)(F_1^2/F_2^2 - 1)$. Wanneer de HU-053 opstart voordat een te meten component is geplaatst, meet het apparaat de frequentie F1. Wanneer daarna de te meten condensator wordt geplaatst, meet het apparaat F2 en wordt het resultaat voor C_x getoond. Op dezelfde manier kan C5+C6, door vergelijking 1 te herschrijven, worden uitgedrukt als een functie van F1 en L1. Door C5+C6 dan te vervangen door de formule van vergelijking 3, wordt L_x geschreven als $L_x = L_1(F_1^2/F_3^2 - 1)$. Omdat de waarde van L1 van tevoren bekend is, meet het apparaat eerst F1, dan F3 en geeft tenslotte het resultaat weer. Merk op dat in de pF-modus knop SW3 ingedrukt kan worden om het nulpunt te kalibreren; daarbij wordt F1 gemeten en opgeslagen in het geheugen. Deze opgeslagen kalibratiewaarde wordt ook gebruikt in μH -modus.

versie van Jiri Recek [4]. Hierdoor kan elke spoel met elke tolerantie worden gebruikt zonder dat de nauwkeurigheid wordt beïnvloed. In alle gevallen is de nauwkeurigheid van de condensator echter nog steeds bepalend voor de meetnauwkeurigheid.

- > Pas het programma aan om de eerste regel van het display te gebruiken, die op dit moment geen bijzonder bruikbare informatie toont.
- > Voeg een spanningsregelaar en/of beveiliging tegen omgekeerde polariteit toe voor meer flexibiliteit en veiligheid wat betreft de voedingsspanning.
- > Vind weerstandswaarden om het trippen van de U2B comparator bij 63% van VCC in te stellen zonder afhankelijk te zijn van handmatige aanpassing.
- > Verminder de fout die wordt geïntroduceerd door de drempelspanning V_{CE} van Q2 in μF -modus. Op dit moment begint het laden van de condensator niet bij 0 V, maar bij 0,2 V. Dit is een leuke huiswerkopgave voor de lezer, net als de vorige ideeën.

Veel succes! 

240374-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via jean-francois.simon@elektor.com of de naar redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Gerelateerde producten

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

WEBLINKS

- [1] Producthandleiding van de fabrikant: <https://tinyurl.com/5hxvcxy3>
- [2] LC-meter van Neil Heckt: <https://tinyurl.com/mv65tzc2>
- [3] Linear Applications Handbook: <https://tinyurl.com/2hfmr2c>
- [4] LC-meter van Jiri Recek: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/lc-metr-s-89c2051.html>