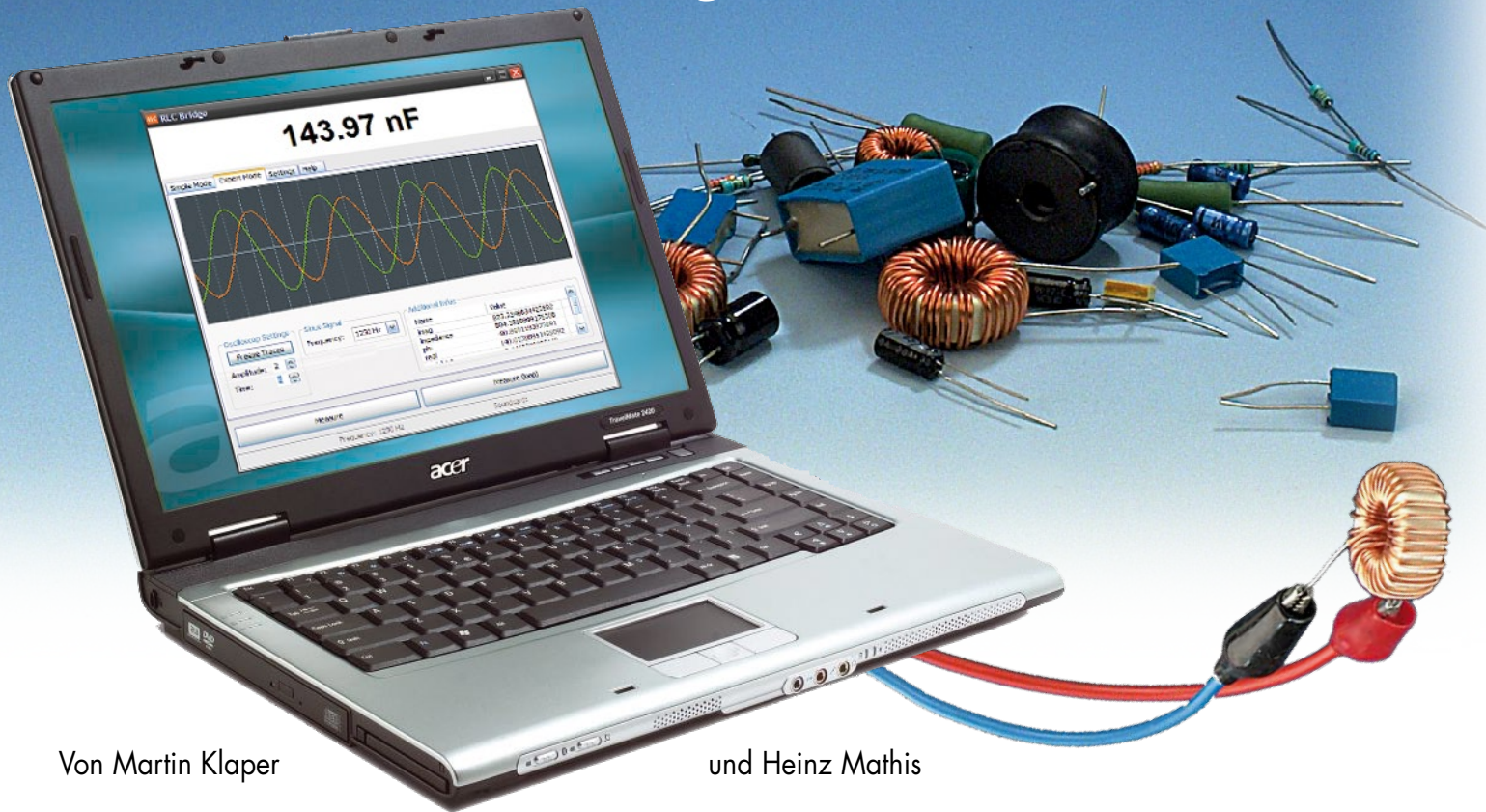


2-Euro-RLC-Meter

Impedanz-Messung mit der Soundkarte



Von Martin Klaper

und Heinz Mathis

Kann man für weniger als zwei Euro eine RLC-Messbrücke bauen? Unsere Autoren meinen definitiv „Ja“ – und sie können das auch beweisen! Hier ist eine kleine und patente Schaltung, mit der sich RLC-Messungen schnell und sehr kostengünstig realisieren lassen.

Seit vielen Jahren verwenden die beiden Autoren eine Marconi RLC-Messbrücke, bei der ein Zeigerinstrument mit zwei Reglern auf Null abgeglichen werden muss. Dann kann man an den Einstellungen der beiden Regler den Wert von R, L oder C ablesen. Außerdem lässt sich der Verlustfaktor $\tan \delta$ bzw. die Güte Q ablesen.

Allerdings sind eine solche Messbrücke oder ein teures RLC-Meter natürlich nicht in jedem Elektroniker-Haushalt vorhanden - ein PC und eine Soundkarte aber fast immer. Und mit dieser lässt sich vieles wunderbar messen, wie einer der Autoren schon mit einem interessanten Elektor-Projekt gezeigt hat [2]. Damals wurde ein EKG mit einer

Soundkarte aufgenommen – und schon da entstand die Idee, die Soundkarte auch zur Messung von Impedanzen einzusetzen.

Eigentlich sollte das gehen: Mit den Eingängen einer Stereo-Soundkarte kann man auf zwei Kanälen eine Spannung messen. Der Strom ließe sich an einem Widerstand bestimmen, der mit dem Prüfling (R, L oder C) in Serie geschaltet wird. Wenn man eine Wechselspannung an den Prüfling anlegt und den Strom durch den Prüfling misst, sollte es eigentlich möglich sein, die (komplexe) Impedanz zu bestimmen. Zur Anregung des Prüflings könnte man einen Ausgang der Soundkarte verwenden. Ließe sich so eine Mess-

Lösung auf einem PC implementieren? Nach etwas Überlegen, Löten und Programmieren ist die Antwort unserer Autoren ein überzeugtes Ja.

Verwenden lässt sich praktisch jeder PC, auch wenn es ein verstaubter 500-MHz-Rechner ist. Man muss ihn nicht einmal öffnen, da die Soundkartenanschlüsse von außen zugänglich sind. Natürlich können wir nicht garantieren, dass es auf jedem PC läuft. Bis jetzt hat es aber auf verschiedenen PCs und Laptops mit Windows XP und Windows Vista prima funktioniert. Sonst braucht es nicht viel: Die kleine hier beschriebene Schaltung aufbauen, an die Soundkarte anschließen und das Programm starten.

Die ganze Hardware besteht aus zwei Widerständen und einem Doppel-Operationsverstärker - und kostet weniger als 2 Euro! Sie kann problemlos auf einer Lochraster-Platine oder einem Experimentierboard aufgebaut werden. Und dabei kann unsere Low-Cost-Impedanz-Messbrücke Spulen, Kondensatoren und Widerstände mit erstaunlicher Genauigkeit messen, was die Autoren mit einem sehr viel teureren Labor-RLC-Meter in vielen Messungen nachgeprüft haben.

Impedanz

Impedanz (von lat. impedire = hindern, hemmen) ist grundsätzlich Opposition gegen den Stromfluss. Diese „komplexe Größe“ hat einen Realteil und einen Imaginärteil. Bei ohmschen Widerständen ist der Imaginärteil verschwindend klein (es sei denn, es handelt sich um gewickelte Drahtwiderstände). Ideale Spulen und Kondensatoren haben nur einen Imaginärwert. Reale Spulen und Kondensatoren haben neben ihrem – hoffentlich überwiegenden – Imaginärteil auch einen Realteil, der die Verluste, also die Abweichung vom Ideal darstellt. Für dieses Projekt stellen wir uns das reale Bauelement als Serienschaltung eines als ideal angenommenen Elements und eines ohmschen Widerstandes vor, wobei Letzterer die Verluste repräsentiert. Bei einer gegebenen Frequenz kann eine Impedanz in Polarkoordinaten oder in kartesischen Koordinaten geschrieben werden.

$$Z = |Z| \angle \theta = R + jX$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ und } \theta = \arctan(X/R)$$

Z ist die (komplexe) Impedanz in Ohm, $|Z|$ ist der Betrag von Z, θ ist der Winkel von Z, R ist der Realteil und jX der Imaginärteil von Z (siehe auch die Formeln im Kasten).

Im Folgenden stellen wir zwei verschiedene Messprinzipien vor, die (angeregt durch den oben genannten Elektor-Artikel) unabhängig voneinander entstanden sind. Messprinzip I ist ein Adaptiver Linear-Kombinierer mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Messung bei konstanter Frequenz; Messung der Phasenlage und der Verluste). Das Messprinzip II hört auf den schönen Namen „Approximieren der Kennlinie bei variabler Messfrequenz mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate“. Doch der Reihe nach.

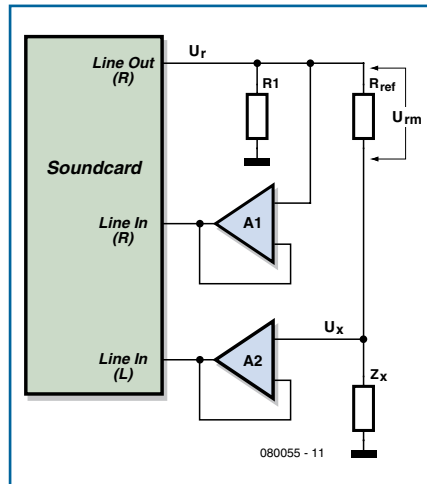


Bild 1. Blockschaltbild für Messverfahren I.

Messprinzip I

Einer der beiden Ausgangskanäle der Soundkarte versorgt den Spannungsteiler aus dem Referenzwiderstand R_{ref} und Prüfling Z_x mit einem sinusförmigen Signal (Bild 1). Der zweite Ausgangskanal der Soundkarte wird nicht verwendet; man könnte ihn in einer erweiterten Version zur Umschaltung des Messbereichs verwenden (in der gegenwärtigen Ausführung wird der Messbereich von Hand umgeschaltet). Die beiden Eingangskanäle messen die beiden Spannungen am Spannungsteiler. Somit lässt sich die Beziehung zwischen den beiden Spannungen zu jeder Zeit messen. Zwar wäre es theoretisch möglich, die Spannung an R_{ref} zu dem Spannungswert in Beziehung zu setzen, den man mit dem Programm zur Anregung des Prüflings vorgibt. In der Realität weisen alle Soundkarten allerdings Latenzen auf, was nichts anderes heißt, dass

die Ausgangsspannung erst verspätet am Ausgang „erscheint“ (siehe unser Soundkarten-Test in diesem Heft). Durch die Nutzung von zwei Eingängen der Soundkarte umgeht man dieses Problem elegant.

R1 dient als Referenzpotential für den Ausgang. Die beiden Operationsverstärker mit einer Verstärkung von eins dienen als Puffer mit hoher Eingangs- und niedriger Ausgangsimpedanz. Die sinusförmige Spannung U_r (Line-Out), die an die Messschaltung angelegt wird, wird im rechten Kanal gemessen. Die am unbekanntem Bauteil Z_x abfallende Spannung wird über den linken Kanal bestimmt. Als Operationsverstärker wird ein LM358 eingesetzt (Bild 2), wobei jeder ähnliche Verstärker auch funktionieren würde. Der Opamp wird aus Batterien mit ± 3 Volt gespeist. Die Speisespannung ist bewusst niedrig gewählt, um den Soundkarten-Eingang zu schonen, wenn etwas schief geht.

Die Messgenauigkeit hängt vom Referenzwiderstand R_{ref} ab. Es ist deshalb wichtig, diesen Wert sehr genau zu kennen. Zur Messbereichsumschaltung muss R_{ref} umgesteckt werden. Um möglichst genaue Resultate zu erhalten, muss der Referenzwiderstand nämlich möglichst in der Größenordnung des zu messenden Bauteils liegen. Um die Bedienung noch komfortabler zu gestalten, könnte man später eine automatische Messbereichsumschaltung realisieren (gesteuert über die noch freie Output-Line der Soundkarte).

Konzept

Zur Bestimmung der Kenngrößen der zu messenden Komponente (R, L oder C) ist das Verhältnis der über dem Referenzwiderstand und dem Prüfling an. Am Prüfling fällt eine Spannung ab, deren Größe und Phasenlage von R, L oder C des Prüflings abhängt. Unsere erste Lösung funktioniert so: Die anregende Spannung U_r (es wird mit einer konstanten Frequenz von z.B. 1250 Hz gemessen) wird einem softwarebasierten „Adaptiven Linearkombinierer“ zugeführt. Dieser besitzt zwei Regler w_0 und w_1 . An diesen dreht unser „Programm“ so lange, bis am Ausgang des Kombinierers eine Spannung entsteht, die der Spannung am Prüfling in Größe

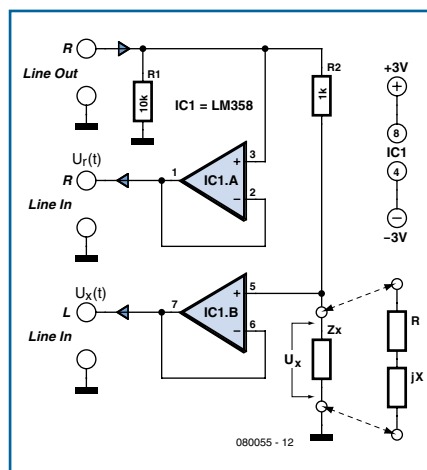


Bild 2. Die Hardware für das Messverfahren I besteht nur aus einem Doppel-Opamp mit zwei Widerständen.

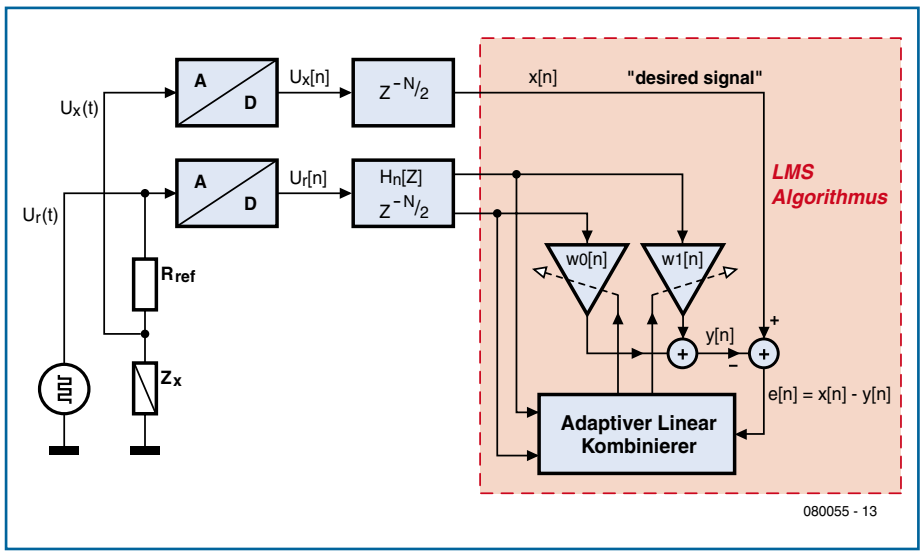


Bild 3. Funktionsschema für das Messverfahren I.

und Phasenlage möglichst exakt entspricht. Möglichst exakt bedeutet hier, dass die Summe der quadrierten Fehler minimal wird. Aus den Koeffizienten w_0 und w_1 kann dann die komplexe Impedanz des Prüflings und damit R , L oder C bestimmt werden. Das Ganze funktioniert also so wie bei der guten alten Marconi-Messbrücke, nur dass das Drehen an den „Reglern“ von einem Programm erledigt wird.

Algorithmus

Es wird der so genannte LMS (Least Mean Square)-Algorithmus (Methode der kleinsten Quadrate) verwendet, der vielfach hintereinander durchlaufen wird. Der LMS verändert die Gewichte der Koeffizienten w_0 und w_1 bei jedem Schritt, danach werden der reale bzw. imaginäre Anteil des Signals sowie der resultierende Fehler berechnet. Auf der Suche nach dem minimalen Fehler geht der LMS wie ein Ski-

fahrer vor, der möglichst rasch ins Tal (also an den tiefsten Punkt) gelangen will. Er korrigiert seine Fahrtrichtung immer so, dass er stets die steilste aller möglichen Strecken fährt. Sobald der Fehler $e[n]$ ein gewisses Minimum unterschreitet, wird die Ausführung des Algorithmus unterbrochen. Die Koeffizienten gelten dann als bestimmt. Mit ihrer Hilfe wird es nun möglich, die gesuchten Größen direkt zu berechnen.

Schaltung

Aus Bild 1 ergibt sich:
 $U_x = I_{Rref} \cdot Z_x = U_{rm} / R_{ref} \cdot Z_x$
 Wobei $U_{rm} = U_r - U_x$
 Mit $U_{rm} = A \cdot \sin(\omega t)$ und
 $U_x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$
 $U_x = w_0 A \cdot \sin(\omega t) + w_1 A \cdot \cos(\omega t)$

Bild 3 zeigt den adaptiven Linearkombiniierer: U_r („Line Out“) wird mit den „Reglern“ w_0 , w_1 so verändert, dass

das gewünschte Signal U_x entsteht. U_x ist das Signal, das angenähert werden soll, $e[n]$ ist der Fehler.

Die gesuchte Impedanz beträgt:
 $Z = R_{ref} w_0 + j R_{ref} w_1$

Software

Ein Java-Programm ist zuständig für die Ausgabe des Sinussignals, das Einlesen der Daten am Line-In-Eingang und die Berechnung der gesuchten Größen.

Die Bedienoberfläche bietet neben einer Darstellung der gemessenen Werte auch eine Anzeige für die abfallenden Spannungen über dem Referenzwiderstand R_{ref} und dem gesuchten Z_x . Der verwendete LMS-Algorithmus lässt sich durch andere Algorithmen ersetzen (Auswahl über Registerkarte „Settings“). Der Algorithmus muss von der Klasse Alg abgeleitet werden und die Methode determine() implementieren (siehe **Bild 4**). Damit können verschiedene Messverfahren verglichen werden. Ein zweites Messverfahren, das mit variabler Frequenz arbeitet, wird weiter hinten beschrieben. Es wäre auch denkbar, hier die klassische Dreivoltmeter Methode zu implementieren. Die Software-Architektur ist in **Bild 5** gezeigt.

Soundkarte

Die Soundkarte tastet das Signal 44.100 Mal pro Sekunde ab. Die Anregung erfolgt wahlweise mit 1000 Hz, 1250 Hz oder 2200 Hz. Die Soundkarte muss einen Stereo-Eingang besitzen (Achtung: Laptops weisen teilweise nur einen Eingangskanal auf). Zwei Punkte gilt es zu beachten: Wenn U_r zu stark aufgedreht wird, entstehen Verzerrungen. Die Größe von U_r geht zwar nicht in die Messung ein, es darf

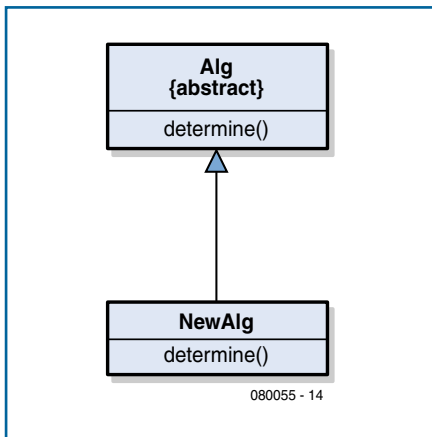


Bild 4. Ableitung eines neuen Algorithmus.

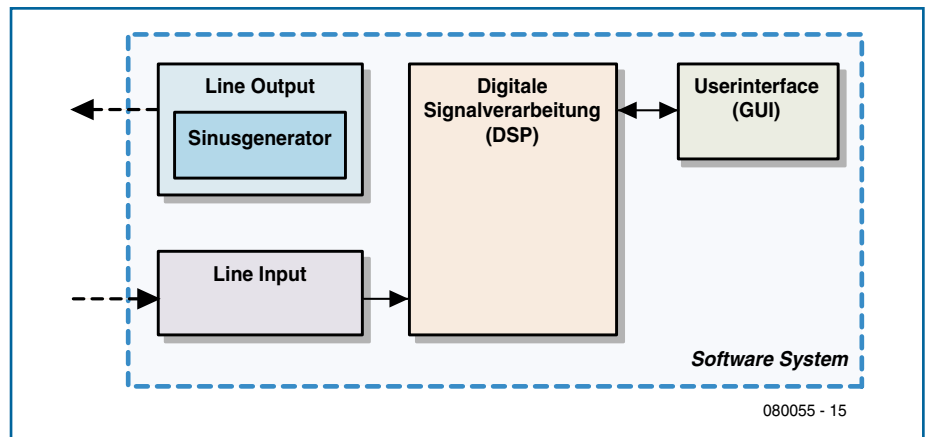


Bild 5. Blockschema der Software.

Die Autoren

Martin Klaper hat sein Studium als Elektroingenieur ETH im Jahre 1977 mit dem Diplom abgeschlossen. Danach war er 20 Jahre in der Firma Crypto AG in der Entwicklung tätig. Von 2000 bis 2005 war er Dozent für Informatik und Telekommunikation an der Fachhochschule Solothurn. Zurzeit unterrichtet er Informatik an der Hochschule Luzern - Technik und Architektur in Horw bei Luzern. Der Autor ist zudem aktiver Funkamateurler mit dem Rufzeichen HB9ARK und interessiert sich besonders für Software Defined Radio Konzepte.

Heinz Mathis hat sein Studium als Elektroingenieur ETH im Jahre 1993 mit dem Diplom abgeschlossen. Nach Industriebjahren als Entwicklungsingenieur bei verschiedenen Firmen in der Schweiz und England ist er als Forschungsassistent im Jahre 1997 an die ETH Zürich zurückgekehrt. Er hat im Bereich Signalverarbeitung im Jahre 2001 promoviert und war danach für die Firma u-blox AG in der Entwicklung von GPS-Empfängern tätig. Heinz Mathis ist seit 2002 Dozent für Mobilkommunikation an der Hochschule für Technik, Rapperswil. Sein Hauptinteresse gilt den Bereichen Hochfrequenztechnik und digitale Signalverarbeitung in den Anwendungsgebieten Mobilfunk und GPS.

allerdings zu keinen Verzerrungen kommen. Die Eingangsverstärker der Soundkarte können auch übersteuert werden, was ebenfalls zu Verzerrungen führt.

Um die Kurvenform auf Verzerrungen zu überwachen, kann das Programm die Spannungsverläufe darstellen. Das Einpegeln kann dann über die Mixer-Einstellungen des Steuer-PCs vorgenommen werden. Wer es noch genauer hinbekommen will, kann auch ein Oszilloskop anhängen oder gar einen Audio-Spektrum-Analyzer, um die Verzerrungen zu messen. Weiterhin ist wichtig, die Balance links-rechts genau einzustellen. Auf dem Software-Oszilloskop kann der zeitliche Bezug von Spannung und Strom an einer Kapazität beziehungsweise einer Induktivität übrigens sehr schön beobachtet werden.

Installation und Betrieb

Die RLC-Messsoftware ist von der Elektor-Website [5] downloadbar (be-

nötigt wird außerdem noch die Java-Laufzeitumgebung [3]). Die Software muss nur noch ausgepackt und gestartet werden.

Das Java-Programm besteht aus drei Teilen (rlc.jar, swt.jar und swt-win32-3236.dll) die alle in denselben Ordner gesetzt werden müssen. Das Programm wird durch Doppelklicken auf rlc.jar gestartet.

Bild 6 zeigt die Programmoberfläche. Durch Anklicken der entsprechenden Reiter kann zwischen einem einfachen Messmodus und einem Experten-Modus gewechselt werden. Im einfachen Modus wird das Messresultat sehr groß angezeigt, so dass es auch aus einiger Entfernung gut ablesbar ist. Zudem wird das Serien-Ersatzschaltbild grafisch angezeigt.

Bei Widerständen erfolgt die Anzeige des Ohm-

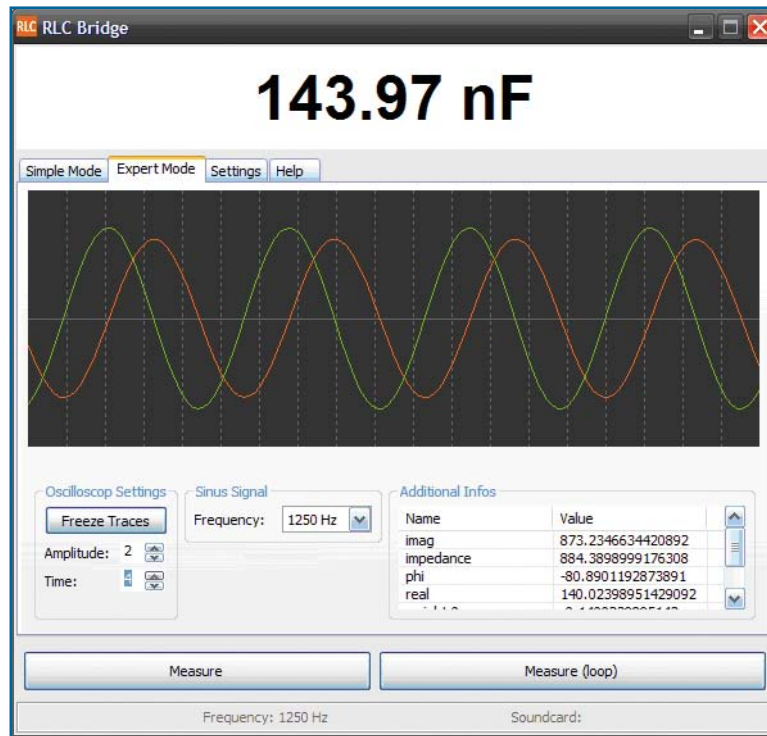


Bild 6. So sieht die Software auf dem Bildschirm aus.

Anzeige

TOP-TEC-PCB

SPITZEN TECHNIK · SCHNELL & GÜNSTIG

Leiterplatten Online Kalkulieren!

HDI Boards ab 50µm ... chemisch Zinn, Silber, Gold ... blind & buried vias ... FR4 HTG ... Flex Boards ...

PROTO-POOL
PROTOTYPEN 2 & 4 LAGEN

48h^{optional}
EXPRESS

2 Lagen	je Leiterplatte (100mm x 100mm)	in 6 AT
	€48,75*	
4 Lagen	je Eurokarte (100mm x 160mm)	in 8 AT
	€130,00*	

INKLUSIVE

- E-Test
- Oberfläche: HAL bleifrei
- FR4 1.55mm, 35µm Cu
- Einrichtungskosten / Plot
- Design Rule Check
- 1x Bestückungsdruck
- 2x Lötstopp
- Leiterbahnen 150µ
- Bohren 0.3mm
- Konturfüräsen
- A.O.I. [multilayer]
- X-Ray [multilayer]

POWER-POOL
PCB SERIEN 1 - 30 LAGEN

48h^{optional}
EXPRESS

2 Lagen	je Eurokarte (100mm x 160mm) ab 8 AT	
	Neu-Bestellung	Nach-Bestellung
10 St.	€21,59*	€13,89*
25 St.	€11,73*	€8,65*
100 St.	€6,48*	€5,71*

* Lieferung nur an Geschäftskunden, exkl. ges. Umsatzsteuer und Versand (€6,50 bis 5kg)

WWW.TOP-TEC-PCB.DE

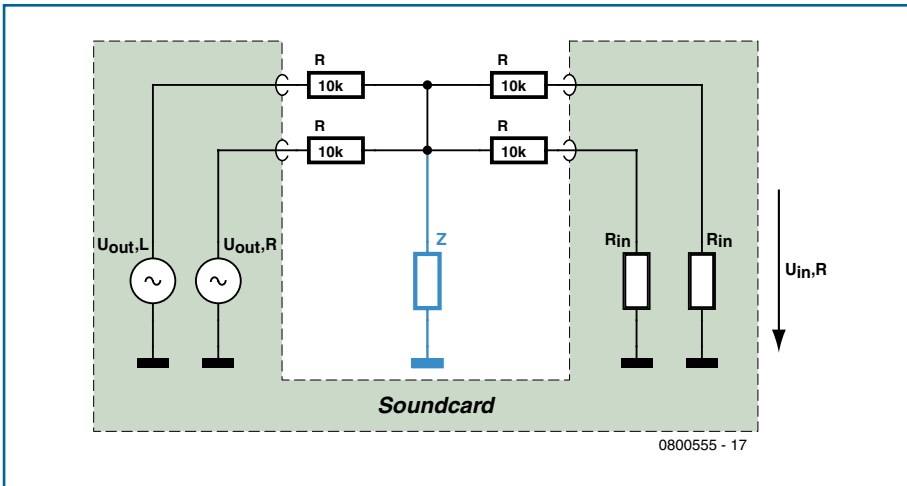


Bild 7. Die Hardware für das Messverfahren II besteht aus vier Widerständen.

Vorteil, dass nun Ein- und Ausgang der Soundkarte vertauscht werden dürfen. Außerdem lässt dieses Messprinzip auch Mono-Soundkarteneingänge zu. Die Nutzung von beiden Stereokanälen bei Ein- und Ausgang mittels dann noch ein bisschen Rauschen weg. Wir haben dann ein kleines Widerstandsnetzwerk gemäß Bild 7.

R_{in} ist der Eingangswiderstand der Soundkarte, der dem Datenblatt entnommen wird. Die Herleitung der gemessenen Impedanzwerte ist in einem kleinen Dokument detailliert beschrieben, das von der Elektor-Website herunter geladen werden kann.

Die Software des Ohmmeters hat nun die Aufgabe, die Signalstärke am Soundkarteneingang zu messen. Sie tut dies über die Ausgabe von verschiedenen Audiotönen. Während sich für eine rein ohmsche Last keine Frequenzabhängigkeit ergibt, ist bei einer induktiven bzw. kapazitiven Last eine mit der Frequenz ansteigende bzw. abfallende Größe zu verzeichnen.

In der Software wird für jede der drei Kenngrößen R, L oder C mittels der minimalen Fehlerquadrate (für alle unterschiedlichen Frequenzen) ein entsprechender Wert angenommen. Zusätzlich werden die daraus resultierenden Residuen berechnet (das sind die normierten Distanzen zwischen Theorie und Messung). Der Wert, welcher zu den kleinsten Residuen führt, ist unser Ergebnis und wird zusammen mit der passenden Einheit angezeigt.

(080055)

Literatur & Weblinks

[1] von Grünigen, Daniel Ch., Digitale Signalverarbeitung, Carl Hanser Verlag, München, 2004

[2] Martin Klaper, „EKG mit Soundkarte“, Elektor 10/2006
www.elektor.de/040479

[3] Java Compiler und Entwicklungsumgebung (JRE, JDK):

Java Runtime Environment (JRE) aktuelle Version 5.0 (für die Programmausführung erforderlich) und J2SE Development Kit (JDK) aktuelle Version 5.0 (erforderlich, um das Programm zu verändern und zu übersetzen)
http://java.sun.com/javase/downloads/index.jsp

[4] Verschiedene DSP-Themen
www.dspguru.com
www.musicdsp.org/archive.php?classid=0

[5] Download der Software
www.elektor.de/080055

werts auch mit Farbringen. Es kann entweder eine Einzelmessung oder eine Dauermessung gewählt werden. Die Dauermessung eignet sich besonders für Abgleicharbeiten, zum Beispiel an einer Spule. Im Experten-Modus wird die Signalfrequenz zur Beurteilung der Messung und zum Einpegeln angezeigt. Es können drei verschiedene Messfrequenzen ausgewählt werden. Zusätzlich werden interessante Werte des LMS-Algorithmus angezeigt. Unter dem Menüpunkt „Settings“ kann zwischen verschiedenen Soundkarten umgeschaltet werden. Zudem ist es hier möglich, zwischen verschiedenen Mess-Verfahren umzuschalten (wenn implementiert), um sie miteinander zu vergleichen.

Wie schon angesprochen, ist eine genaue Kenntnis des Referenzwiderstandes R_{ref} wichtig, da seine Genauigkeit in die Messung eingeht. Anzustreben ist zumindest 1 % Ungenauigkeit. Besteht die Möglichkeit, R_{ref} auf einer Präzisionsmessbrücke auszumessen, sollte davon Gebrauch gemacht werden. Es ist ferner wichtig, dass R_{ref} ein Schichtwiderstand und kein gewickelter (und dadurch auch induktiver) Widerstand ist. Genaue Messungen der Reaktanz sind in einem Bereich von 0,01 bis 100 x R_{ref} möglich. Daher ergibt sich die Notwendigkeit, R_{ref} steck- oder umschaltbar auszuführen.

Messprinzip II

Eine noch einfachere Lösung, mit der sich ein Widerstand Z mittels Soundkarte ausmessen lässt, ist ein einfacher Vorwiderstand R, mit dem unser zu messender Widerstand einen Spannungsteiler bildet. Baut man sich ein symmetrisches T-Glied, hat dies den

Phasenverschiebung φ :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)$$

Typbestimmung:

$\varphi = 0$: Ohmscher Widerstand

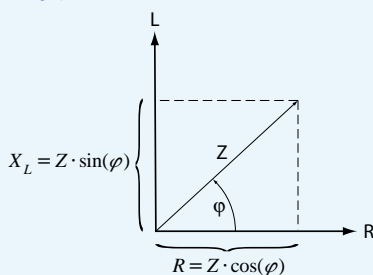
$\varphi < 0$: Kondensator

$\varphi > 0$: Spule

Impedanz Z:

$$Z = \sqrt{(\omega_0 \cdot R_{ref})^2 + (\omega_1 \cdot R_{ref})^2}$$

Realer (R) und imaginärer (X_L oder X_C) Anteil:



Widerstand: $R = Z$

Spule:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

Kondensator:

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot Z}$$