

1 Grundlagen der Impedanzmessung

Die Impedanz ist ein wichtiger Parameter, die der Charakterisierung von elektronischen Komponenten, Schaltkreisen und Materialien die zur Herstellung von Komponenten verwendet werden, dient. Die Impedanz (Z) ist eine komplexe Grösse die graphisch als Zeigerdiagramm mit dem Realteil (Widerstand R) und dem Imaginärteil (Reaktanz X) dargestellt werden kann. Figur 1-1.

Die Impedanz kann im rechtwinkligen Koordinatensystem in der Form $R+jX$ oder im Polarkoordinatensystem mit dem Betrag und dem Phasenwinkel $|Z| \angle \theta$ dargestellt werden.

Figur 1 zeigt ausserdem den mathematischen Zusammenhang zwischen R , X , $|Z|$ und θ . In einigen Fällen ist die Verwendung der Admitanz mathematisch günstiger.

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = Y = G + jB$$

Y : Admitanz

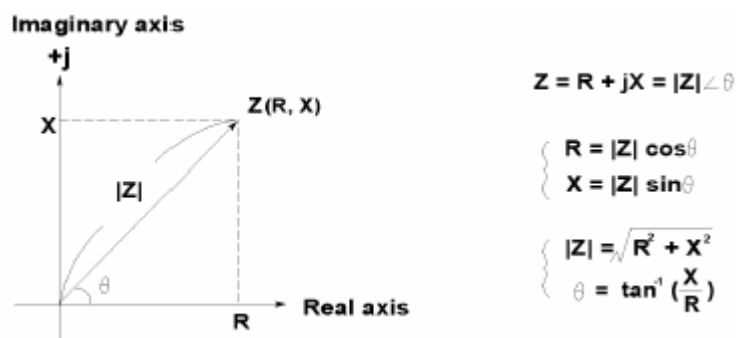
G : Konduktanz

B : Suszeptanz

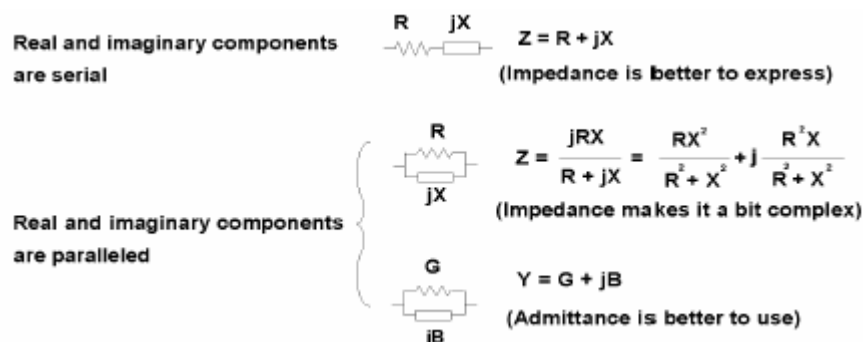
Die Einheit der Impedanz ist Ohm, die der Admitanz Siemens.

Die Impedanz wird gewöhnlich bei der Serieschaltung von Widerstand und Reaktanz verwendet, weil diese einfach als Summe von R und X ausgedrückt werden kann.

Für die Parallelschaltung eignet sich die Admitanz besser. (Siehe Figur 1-2)



Figur 1-1 Impedanz Z bestehend aus Realteil R und Imaginärteil X



Figur 1-2 Serie- und Parallelschaltung von realen und imaginären Komponenten

Die Reaktanz erscheint in zwei Formen, der induktiven (X_L) und der kapazitiven (X_C). Gemäss Definition ist $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ und $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$ wobei f die interessierende Frequenz, L die Induktivität und C die Kapazität ist.



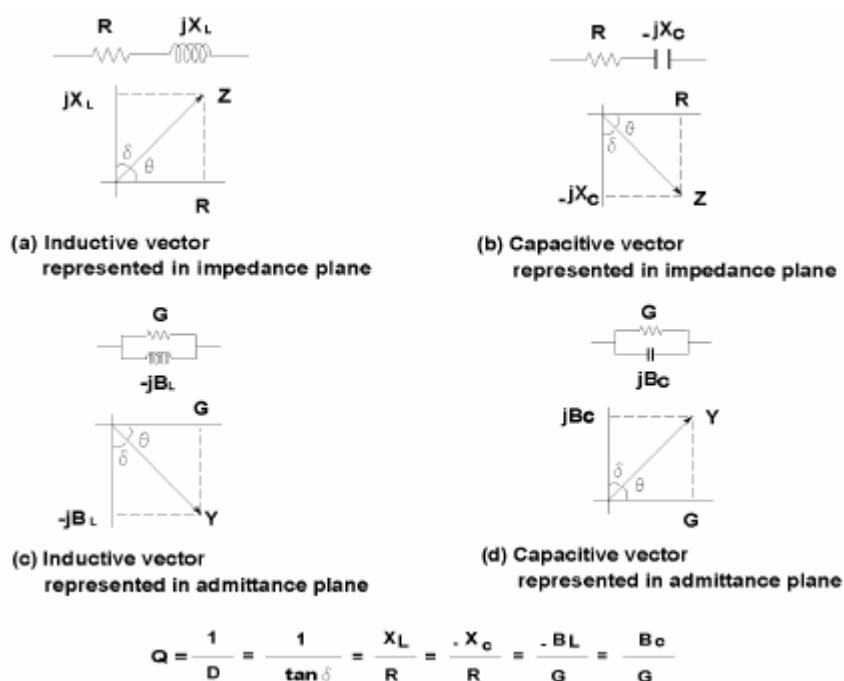
Figur 1-3 Reaktanz in zwei Formen Induktiv (X_L) und Kapazitiv (X_C)

Ein vergleichbarer reziproker Zusammenhang gilt für die Suszeptanz und die Admittanz. Figur 1-4 zeigt typische Darstellungen für einen Widerstand der mit einer Reaktanz in Serie oder parallel geschaltet ist.

Der Faktor Q dient als Mass für die Güte einer Reaktanz und ist als Verhältnis der gespeicherten Energie, zur Energie die im Komponenten in Wärme umgesetzt wird, definiert.

Q ist Dimensionslos und ist als $Q = \frac{X}{R} = \frac{B}{G}$ definiert.

Aus Figur 1-4 ist ersichtlich, dass Q der Tangens des Winkels θ ist. Q wird gewöhnlich bei Spulen verwendet. Für Kondensatoren wird meistens der Verlustfaktor (D) verwendet. Diese Grösse ist der Reziprokwert von Q , der Tangens des komplementären Winkels von θ , also $\tan \delta$. (siehe Figur 1-4)



Figur 1-4 Beziehungen zwischen Impedanz und Admittanz

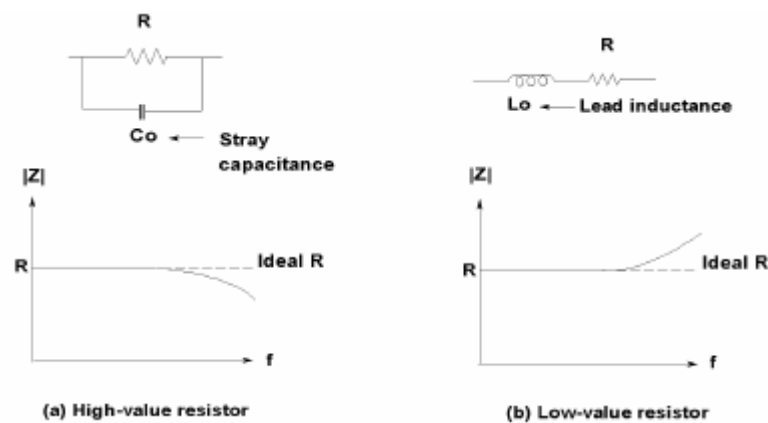
1.1 Faktoren, welche die Messresultate von Komponenten beeinflussen

Die gemessenen Werte eines Komponenten sind von verschiedenen Messbedingungen, wie der Frequenz, der Amplitude des Messsignals usw. abhängig. Der Einfluss dieser Abhängigkeiten ist für unterschiedliche Materialien der Komponenten und unterschiedliche Herstellungsprozesse verschieden. Im Folgenden werden die typischen Faktoren welche die Messresultate beeinflussen aufgeführt.

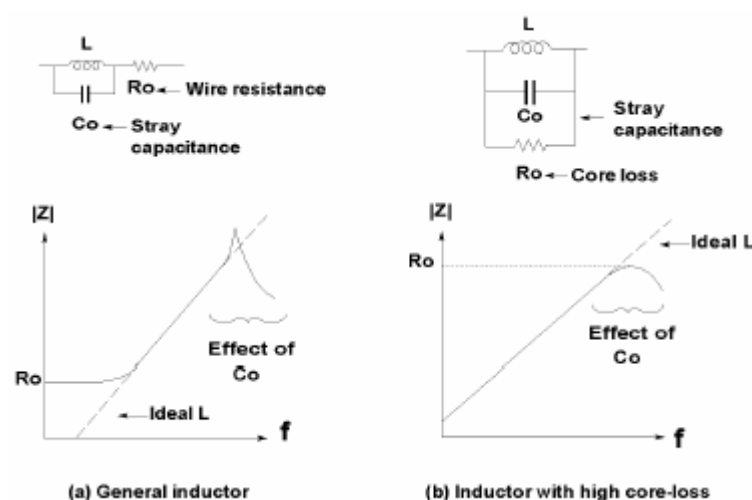
1.1.1 Frequenz

Alle realen Komponenten sind frequenzabhängig, weil diese parasitäre Elemente aufweisen. Je nach Impedanz wirken sich die parasitären Elemente unterschiedlich aus.

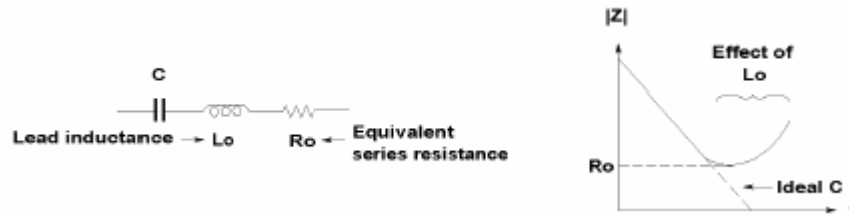
Aus den Figuren 1-7 bis 1-9 ist die Frequenzabhängigkeit realer Widerstände, Spulen und Kondensatoren ersichtlich.



Figur 1-7 Impedanzfrequenzgang von Widerständen



Figur 1-8 Impedanzfrequenzgang von Spulen

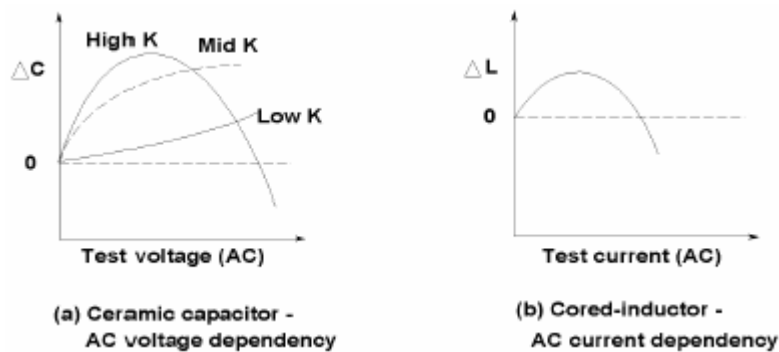


Figur 1-9 Impedanzfrequenzgang von Kondensatoren

1.2 Amplitude des Testsignals

Die Amplitude des angelegten Testsignals (AC) kann das Messresultat bei einigen Elementen beeinflussen. Bei keramischen Kondensatoren ist die Kapazität zum Beispiel von der Amplitude des Testsignals abhängig. Diese Spannungsabhängigkeit variiert je nach der Dielektrizitätskonstanten (K) des verwendeten Materials. Figur 1-10 a.

Spulen mit Kern sind wegen der elektromagnetischen Hysterese vom Strom des Testsignals abhängig. Die typische AC Stromcharakteristik ist aus Figur 1-10 b ersichtlich.

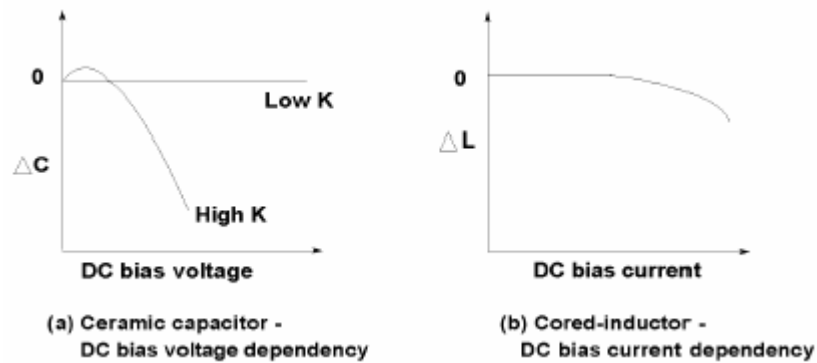


Figur 1-10 Testsignalabhängigkeit (AC) von Keramikkondensatoren und Spulen mit Eisenkern

1.3 Gleichspannungsabhängigkeit

Die elektrischen Eigenschaften bei Halbleitern wie Dioden und Transistoren sind bekanntlich von der angelegten Gleichspannung abhängig. Einige passive Komponenten sind ebenfalls von der angelegten Gleichspannung abhängig. Die Kapazität eines keramischen Kondensators mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten (K) variiert in Abhängigkeit der angelegten Spannung. Figur 1-11 a.

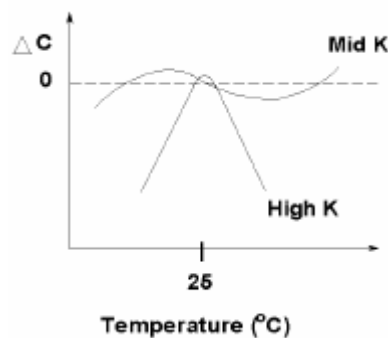
Bei einer Spule mit Kern variiert die Induktivität in Abhängigkeit des Stromes der durch die Spule fließt. Der Grund dafür ist die Sättigungseigenschaft des Kernmaterials. Figur 1-11 b.



Figur 1-11 Testsignalabhängigkeit (DC) von Keramikkondensatoren und Spulen mit Eisenkern

1.4 Temperatur

Elektronische Komponenten sind Temperaturabhängig. Die Temperaturabhängigkeit von Widerständen, Kondensatoren und Spulen wird mit den Temperaturkoeffizienten spezifiziert. Aus der Figur 1-12 ist der Einfluss der Temperatur auf Kondensatoren mit unterschiedlichem Dielektrikum ersichtlich.



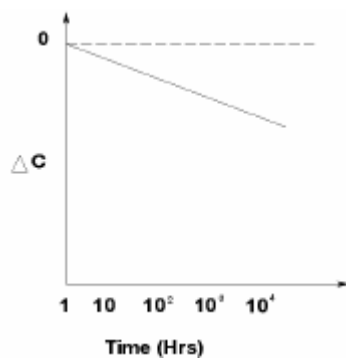
Figur 1-12 Temperaturabhängigkeit von Keramikkondensatoren

1.5 Feuchtigkeit

Die Kapazität und der Verlustfaktor $\tan \delta$ ist bei Folien- und keramischen Kondensatoren relativ stark von der Feuchtigkeit abhängig.

1.6 Alterung

Alle elektronischen Komponenten sind mehr oder weniger einer Alterung unterworfen. Bei Elektrolytkondensatoren ändert sich z.B. die Kapazität mit der Zeit relativ stark durch austrocknen des Elektrolyten.

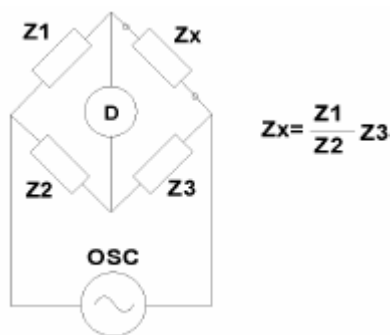


Figur 1-13 Alterungsabhängigkeit von Keramischen Kondensatoren

2 Impedanz Messmethoden

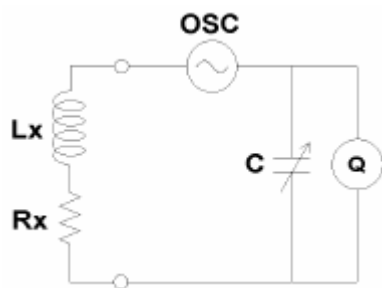
Es gibt eine ganze Reihe von Messmethoden zur Messung von Impedanzen wovon jede ihre Vor- und Nachteile aufweist. Entsprechend den Anforderungen wie Frequenzbereich, Messbereich und Messgenauigkeit wählt man die geeignete Methode. Bei der Wahl einer Messmethode muss immer ein Kompromiss eingegangen werden, weil keine der verschiedenen Methoden alle Messmöglichkeiten aufweist.

2.1 Brücken Methode



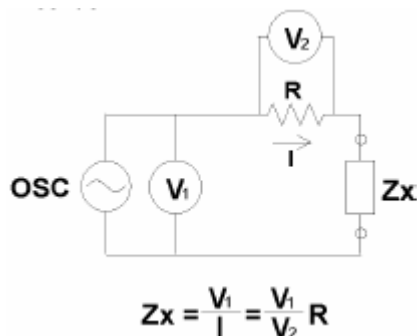
Wenn kein Strom durch den Detektor (D) fließt, so kann der Wert der unbekannten Impedanz Z_x mit der Beziehung zu den anderen Elementen der Brücke ermittelt werden. Unterschiedliche Brückenschaltungen mit Kombinationen von L, C und R Komponenten werden für unterschiedliche Applikationen eingesetzt.

2.2 Resonanz Methode



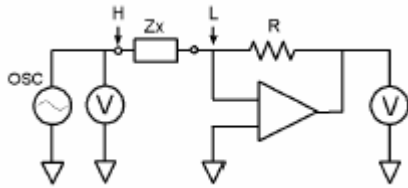
Wenn die nebenstehende Schaltung mit C auf Resonanz abgeglichen wird, so lassen sich L_x und R_x aus der Frequenz, dem Wert von C und dem Wert von Q berechnen. Q wird direkt mit einem Voltmeter über C gemessen. Da die Verluste der Schaltung sehr klein sind, können Q bis zu einem Wert von 1000 gemessen werden.

2.3 I-V Methode



Eine unbekannte Impedanz Z_x kann aus den gemessenen Werten von Spannung und Strom berechnet werden. Der Strom kann aus der gemessenen Spannung über einem bekannten, genauen und niederohmigen Widerstand berechnet werden. In der Praxis wird anstelle des Widerstandes ein Transformator mit geringen Verlusten eingesetzt, um den Einfluss eines Seriewiderstandes zu vermeiden. Der Transformator limitiert allerdings den Frequenzbereich am unteren Ende.

2.4 Automatisch abgleichende Messbrücken Methode



Der Strom fließt durch das Messobjekt Z_X und durch den Widerstand R . Das Potential am Punkt L ist 0 V (virtuelle Masse), weil sich der Strom durch Z_X und R wegen der Strom- Spannungswandlung ausbalanciert. Die Impedanz Z_X wird durch Messung der Spannungen am Anschluss H und über dem Widerstand R berechnet.

Bemerkung:

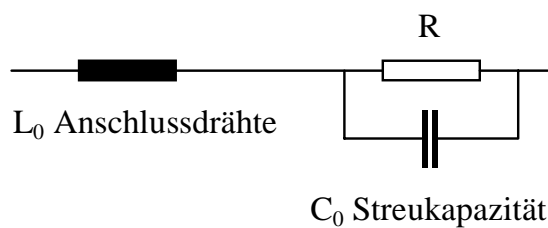
In der Praxis ist die Konfiguration der automatisch abgleichenden Messbrücke für verschiedene Gerätetypen unterschiedlich. Im allgemeinen wird bei LCR-Messbrücken mit einem Frequenzbereich unterhalb 100 kHz ein einfacher I/V Konverter mit einem Operationsverstärker eingesetzt. Diese Gerätetypen haben den Nachteil, dass sich die Genauigkeit bei höheren Frequenzen bedingt durch die Eigenschaften des Operationsverstärkers verschlechtert. Bei Breitband LCR-Messbrücken und Impedanz Analytoren wird der I/V-Konverter mit Null-Detektor, Phasen-Detektor, Integrator (loop Filter) und Vektormodulator realisiert, um eine hohe Genauigkeit für einen breiten Frequenzbereich über 1 MHz zu garantieren

3 Reale passive Komponenten

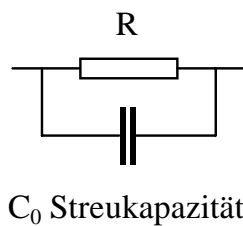
In der Praxis gibt es keine idealen Widerstände, Kapazitäten oder Induktivitäten.

Alle Bauelemente sind weder rein resistiv noch rein reaktiv. Alle realen Komponenten weisen parasitäre Elemente auf, wie parasitäre Induktivitäten bei Widerständen, parasitäre Widerstände bei Kondensatoren, parasitäre Kapazitäten bei Spulen usw. Durch die Wahl unterschiedlicher Materialien und Herstellungstechnologien können die parasitären Elemente für den vorgesehenen Frequenzbereich minimiert werden.

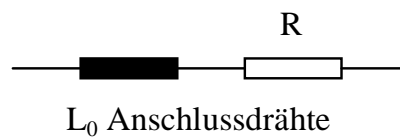
3.1.1 Realer Widerstand



3.1.1.1 Ersatzschaltungen realer Widerstände

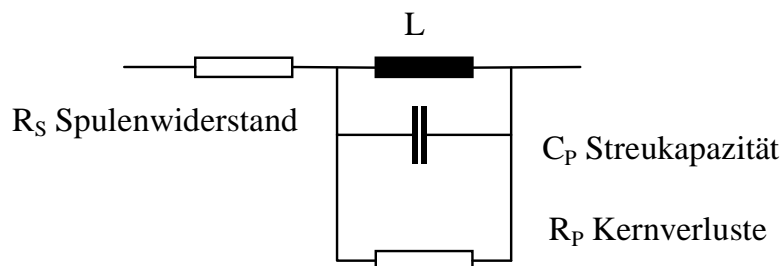


Hochohmige Widerstände

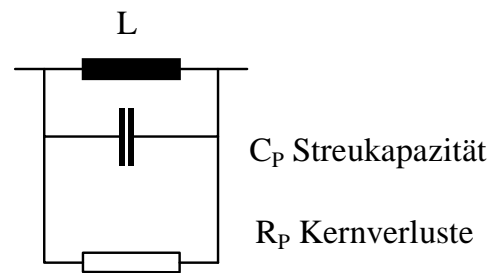
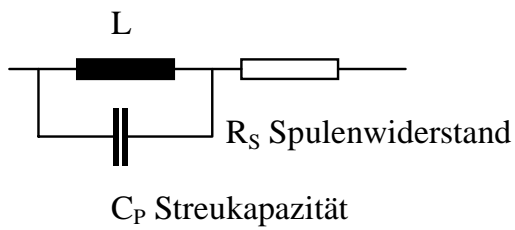


Niederohmige Widerstände

3.1.2 Reale Spule



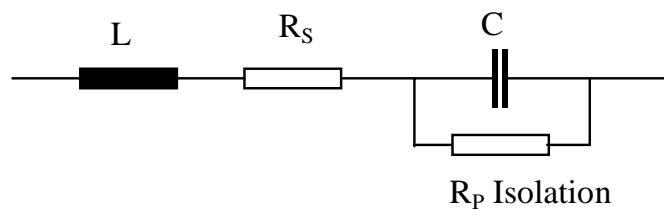
3.1.2.1 Ersatzschaltungen realer Spulen



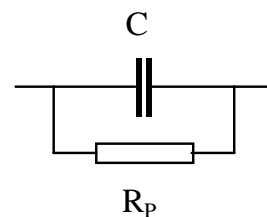
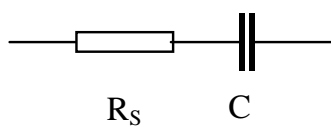
Spulen allgemein

Spulen mit hohen Kernverlusten

3.1.3 Realer Kondensator



3.1.3.1 Ersatzschaltungen realer Kondensatoren



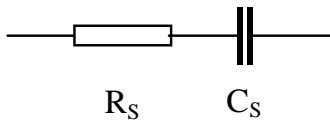
Kondensator mit hoher Kapazität

Kondensator mit niedriger Kapazität

3.2 RLC Messung

Ersatzschaltungen bei der Messung von RLC

3.2.1 Serie Ersatzschaltungen



Verlustfaktor $\tan \delta$

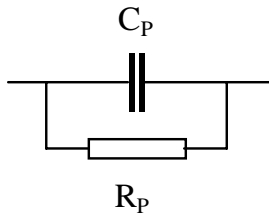
$$D_S = \tan \delta = \frac{R_S}{X_{CS}} = 2\pi f C_S R_S = \frac{1}{Q}$$



Güte Q

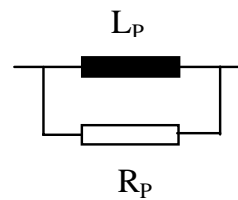
$$Q_S = \frac{X_{LS}}{R_S} = \frac{2\pi f L_S}{R_S} = \frac{1}{D}$$

3.2.2 Parallel Ersatzschaltung



Verlustfaktor $\tan \delta$

$$D = \tan \delta = \frac{X_{CP}}{R_P} = \frac{1}{2\pi f C_P R_P} = \frac{1}{Q}$$



Güte Q

$$Q = \frac{R_P}{X_{LP}} = \frac{R_P}{2\pi f L_P} = \frac{1}{D}$$

3.3 Messgenauigkeit

3.3.1 Genauigkeit der LCR Databridge 401

Wie bei allen RLC Messgeräten hängt die erreichbare Genauigkeit von einer Anzahl Faktoren ab. Diese Faktoren sind:

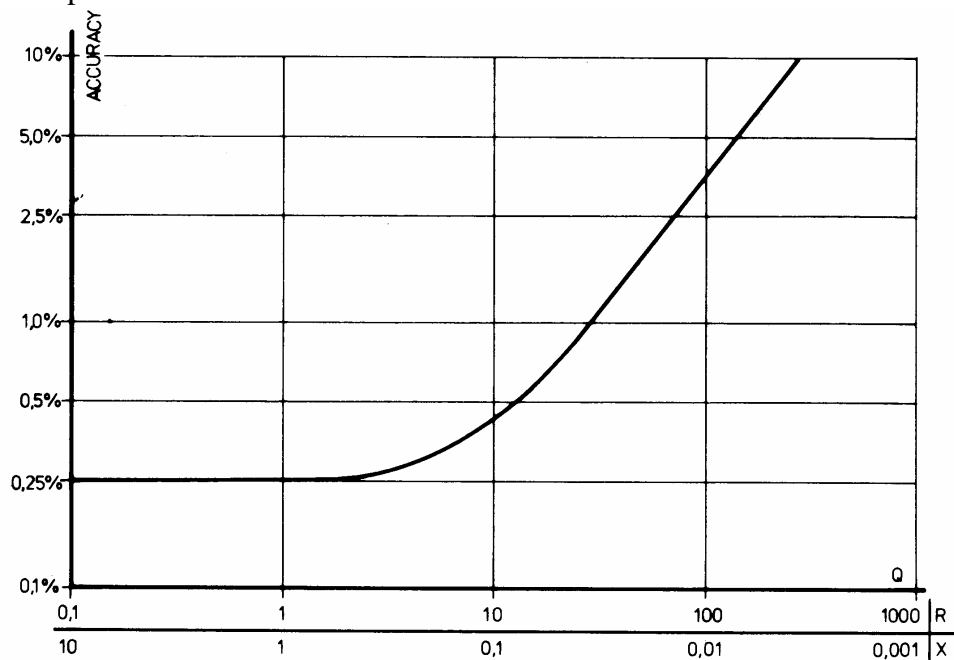
- Der zu messende Typ – Reaktanz oder Widerstand
- Die Messfrequenz
- Der Wert der zu messenden Grösse
- Das Q des zu messenden Komponenten

Die Grundgenauigkeit der LCR Databridge beträgt innerhalb festgelegter Grenzen, die durch die oben aufgeführten Faktoren gegeben sind, $\pm 0.25\%$ des abgelesenen Wertes ± 1 Digit. Diese Angabe gilt nur wenn das Q des zu messenden Komponenten > 10 ist.

(siehe Figur 3.8 Graph showing variation of accuracy with reading for 100 Hz and 1 kHz)

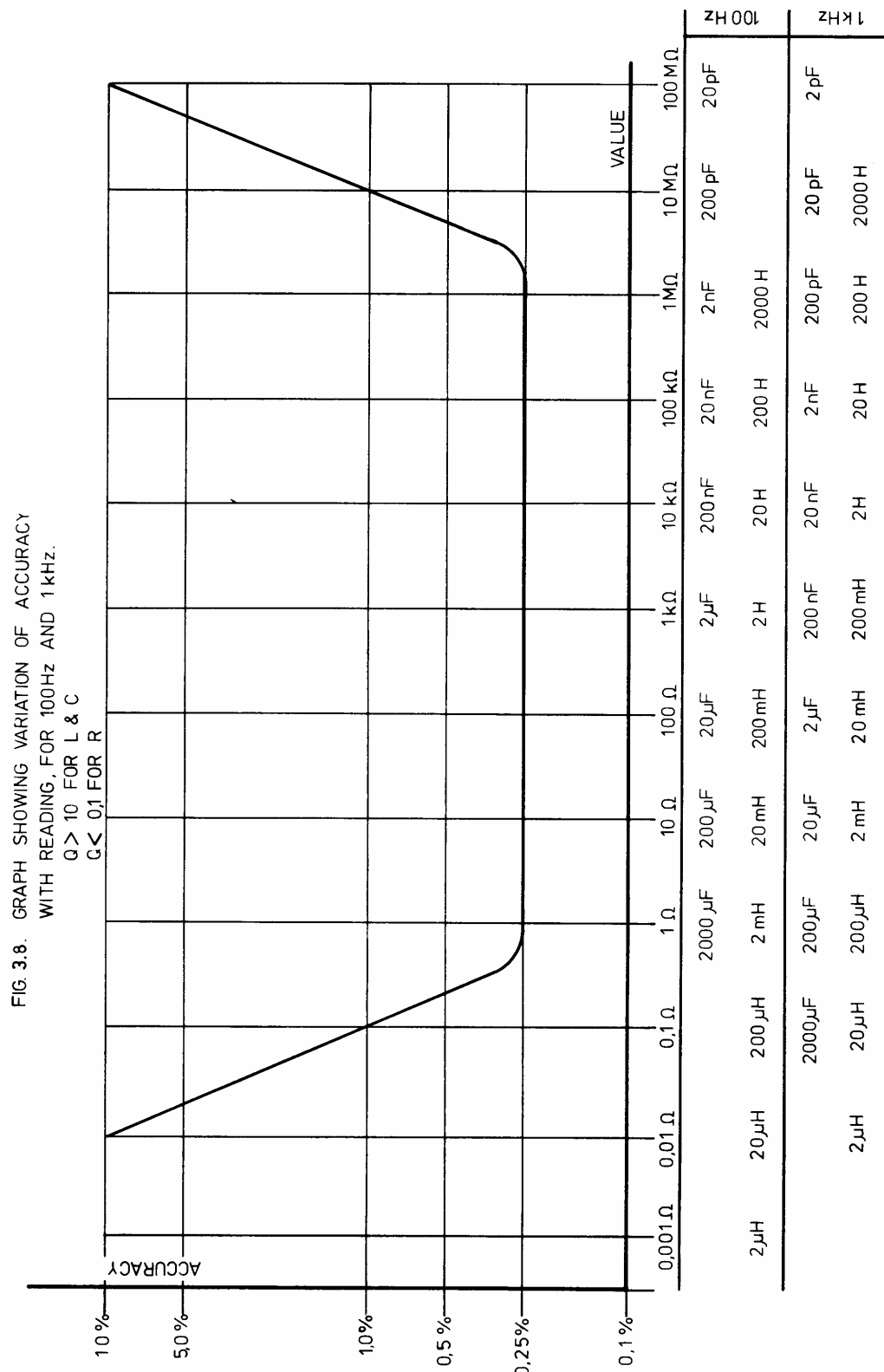
3.3.1.1 Messgenauigkeit in Abhängigkeit von Q

Aus der Figur 3.7 ist der Zusammenhang zwischen der Messgenauigkeit und der Grösse Q des zu messenden Komponenten ersichtlich.



Figur 3.7 Messgenauigkeit in Abhängigkeit von Q

3.3.1.2 Messgenauigkeit in Abhängigkeit der Messfrequenz und der Bereichsgrenzen

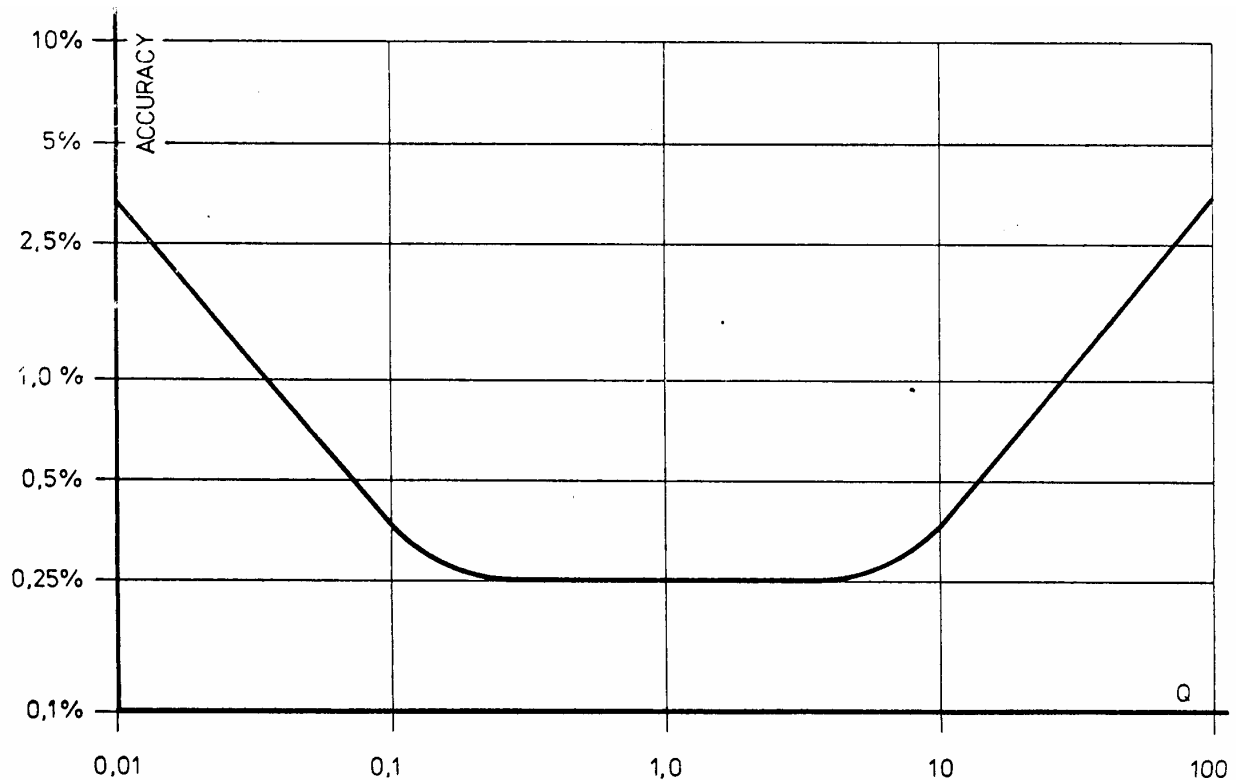


Figur 3.8

3.3.1.3 Genauigkeit der Q Messung

Die Databridge misst das Q mit einer Grundgenauigkeit von $\pm 0.25\%$ des abgelesenen Wertes ± 1 Digit für Q Werte zwischen 0.25 und 4.

Ausserhalb dieses Bereichs verschlechtert sich die Genauigkeit so, dass sie an den Messbereichsgrenzen für Q's von 0.1 bzw. 100, noch $\pm 3.5\% \pm 1$ Digit beträgt.



Figur 3.9 Messgenauigkeit in Abhängigkeit der Grösse von Q

3.3.1.4 Messgenauigkeit bei zwei Fehlerquellen

Bei Messungen ausserhalb des Grundgenauigkeitsbereichs können sowohl Fehler bei der Bereichsüberschreitung als auch Fehler durch ein kleines Q auftreten. Die maximale Abweichung, die durch die Kombination der beiden Fehler entstehen kann, lässt sich durch Addition der beiden Einzelfehler ermitteln.

In der Praxis wird der gesamte Fehler oft aus der Wurzel der Summe der beiden quadratischen Einzelfehler berechnet.

Mit dem folgenden Beispiel wird dieser Sachverhalt erläutert.

Eine Spule wird bei 1kHz gemessen.

Die gemessenen Werte sind: $L = 20\mu\text{H}$, $Q = 0.04$

Der Fehler bei der L Messung ist 1%.

Der Fehler bedingt durch das niedrige Q ist 0.8.

Für die Praxis beträgt der Fehler: $\sqrt{(1\%)^2 + (0.8\%)^2} \approx 1.3\%$