

## Präzisions-Leistungsmesstechnik für Impedanzmessungen: Messen unter Betriebsbedingungen

### Abstract

Impedanzmessungen werden in der Regel mit digitalen LCR-Messgeräten durchgeführt. Dabei werden Strom, Spannung und Phasenwinkel am Prüfling gemessen. Aus den Werten lassen sich die Impedanzparameter bestimmen. Die so gewonnenen Kleinsignal-Impedanzwerte sind für viele nachrichtentechnische Anwendungen brauchbar. Für Prüflinge der Energietechnik und Leistungselektronik werden hingegen Präzisions-Leistungsmessgeräte eingesetzt, die ebenfalls Strom, Spannung und den Phasenwinkel über Wirk- und Scheinleistung ermitteln.

Präzisions-Leistungsmessgeräte arbeiten entsprechend den zu messenden Produkten der Energietechnik und Leistungselektronik von DC bis zu einigen MHz. Die genaue phasenrichtige Messung bis zu einigen MHz wird durch die Anforderung der Leistungselektronik bei frequenzumsetzenden Verfahren (PWM) und Ansteuerungen moderner Leuchtmittel benötigt. Müsste nur der Gleichstromwiderstand gemessen werden, dann genügte ein Ohmmeter. Es müssen zusätzlich die vorhandenen induktiven und kapazitiven Anteile mit ihren frequenzabhängigen Wechselstromverlusten gemessen werden.



**Bild 1: Präzisions-Leistungsmessgerät LMG500**

Die LCR-Impedanzmessgeräte der Nachrichtentechnik arbeiten im Kleinsignalbereich mit einer sinusförmigen Messspannung bei einer oder mehreren festen Frequenzen. Die so gewonnenen Kleinsignalimpedanzwerte werden z.B. in der Fertigungskontrolle zum Vergleich mit Gut-Mustern genutzt. Für den tatsächlichen Einsatz unter Betriebsbedingung ist damit meist keine Aussage zu machen. Auch die bei hochwertigen Impedanzmessgeräten zuschaltbaren DC- Bias-Ströme und -Spannungen bringen nur in Ausnahmefällen eine hinreichende Annäherung an den tatsächlichen Betrieb.

## Die Gründe sind vielfältig

Das Großsignalverhalten (Großsignal-Impedanzwerte) und insbesondere der Wirkanteil (entsprechend den Verlusten) unterscheiden sich aufgrund vielfältiger nichtlinearer Einflüsse deutlich vom Kleinsignalverhalten. Aussteuerungsabhängige Eisenverluste, temperaturabhängige Eisenverluste sowie temperaturabhängige Kupferverluste beeinflussen das Verhalten zusätzlich. Der Betrieb erfolgt mit nichtsinusförmigen Spannungen und Strömen, d.h. mit Frequenzgemischen. Schon deshalb ist eine Messung des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung nicht möglich, da sich der Phasenwinkel nur auf eine bestimmte Frequenz bezieht. Auch das übliche Ersatzschaltbild, bestehend aus Verlustwiderstand und Reaktanz, ist nicht mehr zutreffend. Einzig ein Betragswert der Impedanz, berechnet aus Effektivspannung und Effektivstrom, sowie der Leistungsfaktor beschreiben den Prüfling. Da die im Leistungsfaktor  $\lambda$  enthaltenen Verlustanteile je nach physikalischer Ursache mit verschiedenen Potenzen der Frequenz ansteigen, ist die Umrechnung der Verluste auf andere Frequenzen und Frequenzgemische kaum möglich.



Bild 2: Filterkreisdrosseln als typische dreiphasige Prüflinge

## Mehrphasiges Betriebsmittel als Prüfling

Dreiphasendrosseln, Drehstromtrafos und Mehrphasenmotoren können wegen der Verkopplung der Phasen über gemeinsame Eisenwege nicht Phase für Phase nacheinander gemessen werden. Die für den Betrieb wichtigen Eigenschaften sind nur mit dreiphasigen Messungen erfassbar. Die Kleinsignal-Impedanz ist aussagefähig, wenn nur eine vernachlässigbare Eigenerwärmung des Bauteiles erfolgt und die Strom- und Spannungswerte so gering sind, dass keine nennenswerten Verzerrungen durch Oberwellen und damit neue Frequenzanteile auftreten. Die Großsignal-Impedanz ist jedoch in allen anderen Fällen aussagefähig. Insbesondere bei Messungen unter den geplanten Betriebsbedingungen sind wichtige Informationen über die Wirkverluste und deren Abhängigkeit von verschiedenen Einflußgrößen ermittelbar.

## Messverfahren für die Großsignal-Impedanz

Typisch ist hier die Trennung zwischen speisender Quelle und Messgerät. Als Quelle kommen einstellbare Strom- und Spannungswerte fester Frequenz oder auch nicht sinusförmige Signale aus-

reichender Leistung zum Einsatz. Als Messgerät ist ein modernes Leistungsmessgerät (z.B. die Serie LMG von ZES ZIMMER) allen Multimetern überlegen, weil die wichtigsten Anforderungen der Applikation auch den Grundanforderungen an moderne Leistungsmessgeräte entsprechen. Dies sind insbesondere ein weiter Messbereich für Spannung und Strom, die Messung der Wirkleistung, das mehrphasige Messen (falls es aufgrund des Prüflings erforderlich ist), die galvanische Trennung zwischen den Spannungs- und Stromeingängen sowie ein weiter Frequenzbereich und eine hohe Messgenauigkeit. Gefordert wird außerdem eine Anzeige des Betrags der Impedanz als Quotient aus Effektivspannung und Effektivstrom, komfortable Darstellungs- und Kommunikationsmöglichkeiten sowie hohe Sicherheitsstandards der Geräte. Dies betrifft auch das Zubehör zum Messen von Spannungen und Strömen im kV- und kA-Bereich.

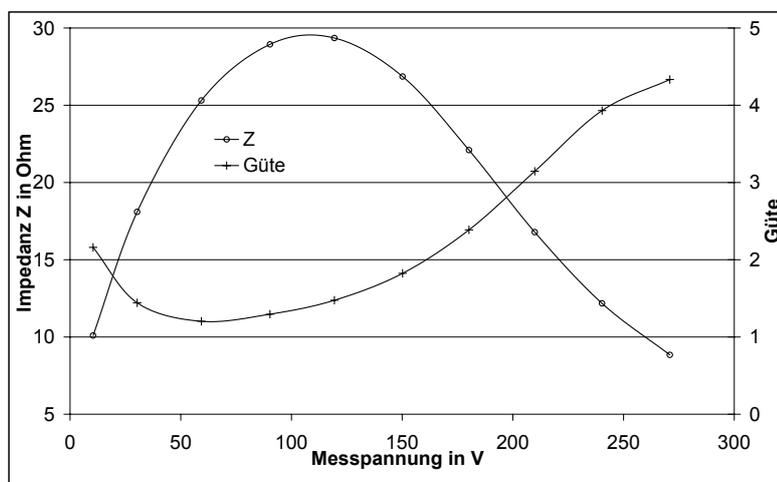
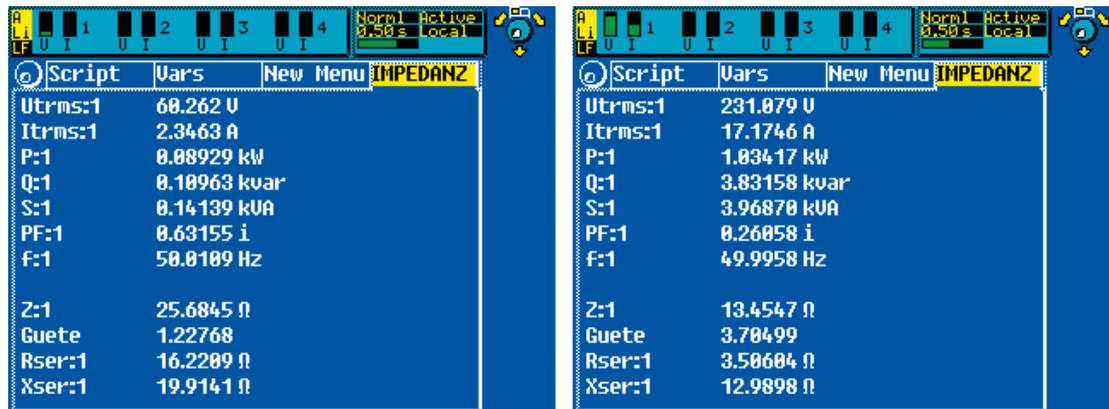


Bild 3: Betrag und Phase der Impedanz in Abhängigkeit von der Aussteuerung

## Ein Beispiel

Es wurden Beispielmessungen mit sinusförmigen Größen durchgeführt, weil damit der direkte Vergleich der Messergebnisse mit den Daten einer LCR-Messung möglich ist. Der Leistungsfaktor entspricht dann dem  $\cos \varphi$  und bei geringen Verlusten näherungsweise dem Verlustwinkel  $\tan \delta$ . Die Güte  $Q$  wird über den Formeleditor des LMG500 errechnet und im benutzerdefinierten Kundenmenü angezeigt. Die Messung soll die Aussteuerungsabhängigkeit der Impedanzwerte zeigen. Bei nichtsinusförmiger Aussteuerung ist die Abweichung zwischen Kleinsignal- und Großsignal-Impedanz im allgemeinen noch ausgeprägter. Das anwenderdefinierte Impedanz-Menü des Leistungsmessgerätes LMG500 zeigt auf einen Blick alle interessierenden Mess- und Rechenwerte an. Bei Aussteuerung mit ca. 60V zeigt der Prüfling eine Impedanz  $Z$  von 25,68  $\Omega$  und eine Güte von 1,22 (links), nach Erhöhung der Aussteuerung auf 230V fällt die Impedanz  $Z$  auf die Hälfte (13,45  $\Omega$ ) und die Güte steigt auf den dreifachen Wert (3,70) an (rechts). Führt man die Messung mit einer ausreichenden Anzahl von Betriebspunkten durch, so können auch die Zwischenwerte interpoliert werden. Damit ist der gesamte nichtlineare Verlauf der Großsignal-Impedanz im Betriebsbereich bestimmt.



Script	Vars	New Menu	IMPEDANZ
Utrms:1	60.262 U		
Itrms:1	2.3463 A		
P:1	0.08929 kW		
Q:1	0.10963 kvar		
S:1	0.14139 kVA		
PF:1	0.63155 i		
f:1	50.0109 Hz		
Z:1	25.6845 $\Omega$		
Guete	1.22768		
Rser:1	16.2209 $\Omega$		
Xser:1	19.9141 $\Omega$		

Script	Vars	New Menu	IMPEDANZ
Utrms:1	231.079 U		
Itrms:1	17.1746 A		
P:1	1.03417 kW		
Q:1	3.83158 kvar		
S:1	3.96870 kVA		
PF:1	0.26058 i		
f:1	49.9958 Hz		
Z:1	13.4547 $\Omega$		
Guete	3.70499		
Rser:1	3.50604 $\Omega$		
Xser:1	12.9898 $\Omega$		

Bild 4: Anwenderdefiniertes Impedanz-Menü des Leistungsmessgerätes LMG500

a) Aussteuerung mit ca. 60V: große Impedanz, kleine Güte

b) Aussteuerung mit 230V: kleine Impedanz, große Güte

## Zusammenfassung

Es bleibt festzuhalten, dass die Messung der Großsignal-Impedanz handelsübliche LCR-Messgeräte vor große Probleme stellt. Der Einsatz moderner Präzisions-Leistungsmessgeräten hingegen ermöglicht verblüffend einfache Lösungen.

## Autor

Dipl.-Ing. Harald Gebstättel  
Ingenieurdienstleistung und Anwendungsberatung  
ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH