

Sicheres Messen mit Multimetern

Messen von Wechselgrößen (Teil 1)

K. Bödeker, Berlin; R. Kindermann, Nürnberg

Multimeter sind im wahrsten Sinne des Wortes „Vielfach“-Messgeräte, sie können – mit ihrem Zubehör – fast alles. In den bisherigen Beiträgen [1][2] ging es vorwiegend um die sichere Gestaltung der „MM“ und um ihre Eigenschaften bei analoger (AMM) oder digitaler (DMM) Messwertverarbeitung. In [3] wurde erläutert, wie mit den MM so genau wie nötig gemessen werden kann. Im folgenden Beitrag geht es um die besonderen Bedingungen, die beim Messen zu beachten sind, wenn die zu messenden Wechselströme oder Wechselspannungen keine reine Sinusform aufweisen.

1 Besonderheiten der Messaufgabe

Das Feststellen der Werte von Wechselspannungen oder -strömen sind die häufigsten Messaufgaben, mit denen sich die Elektrofachkräfte beim Errichten und Betreiben von elektrischen Anlagen bzw. im Bereich der elektrischen Energietechnik zu befassen haben. Für beide Messungen sind die modernen Multimeter ausgezeichnet geeignet. Allerdings, es sind bestimmte Grenzbedingungen zu beachten, um immer sicher [1] [2] und genau genug [3] messen zu können. Jede Elektrofachkraft muss die Merkmale der zu messenden Größen und die Grenzen der Multimeter genau kennen, um sie beim Vorbereiten der Messungen und beim Beurteilen der Messergebnisse berücksichtigen zu können.

Beim Messen von Wechselgrößen sind es besonders deren Kurvenformen sowie die Spitzenwerte und Oberschwingungsanteile, die der Messwertverarbeitung durch das MM und damit der Anzeigegegenauigkeit Grenzen setzen. Hinzu kommen die im Messobjekt vorhandenen Störspannungen sowie die Auswirkungen der im MM eingesetzten Gleichrichterschaltung auf die Messwerte (Messunsicherheit). Sie alle haben erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse und sind daher bereits bei der Auswahl des MM bzw. der Messmethode zu berücksichtigen. Sind diese Zusammenhänge nicht bekannt, so kommt es zu einer unkritischen oder falschen Beurteilung der Messaufgabe, der Messgröße oder des anzuwendenden MM. Dieses kann zu erheblichen Messfehlern und damit letztlich auch zur Gefährdung von Personen und Sachen führen.

2 Besonderheiten der Messgröße

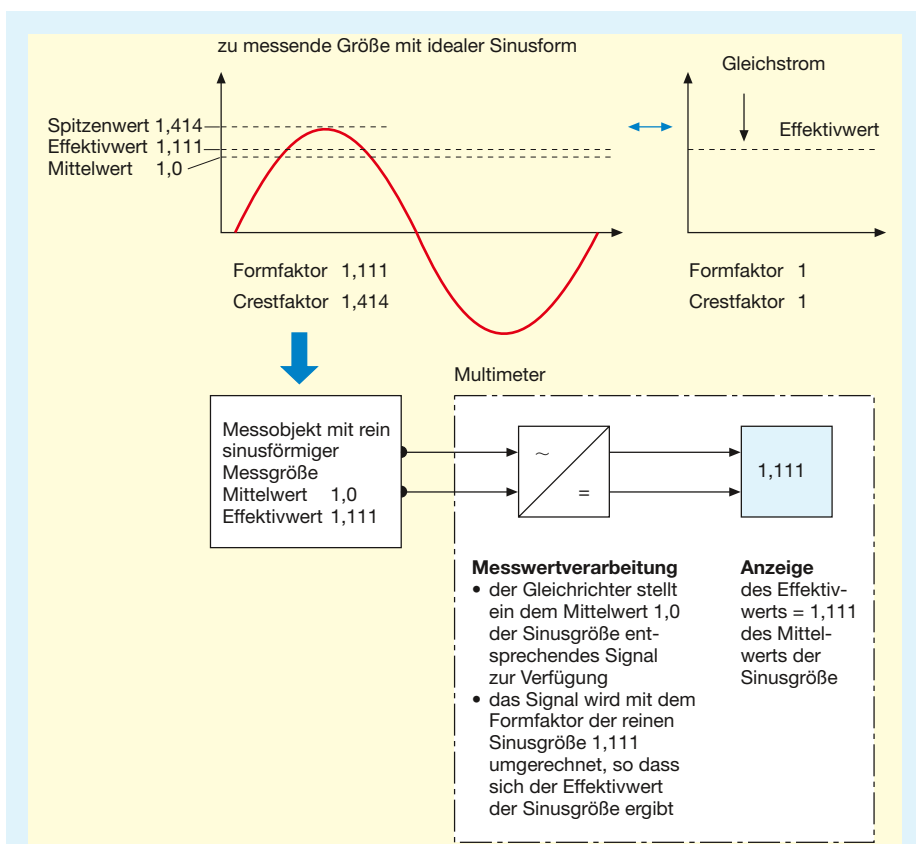
In allen Dokumentationen der elektrischen Betriebsmittel, in den Errichtungsvorschriften der elektrischen Anlagen und allen Veröffentlichungen zur elektrischen Energietechnik werden die Bemessungswerte von Wechselspannung oder -strom als Effektivwerte angegeben. Nur in Ausnahmefällen, wenn es z. B. um das Beurteilen der Isolationsfestigkeit oder der Kurzschlussfestigkeit von Bauteilen, Betriebsmitteln oder Anlagen geht, werden Spitzenwerte (Scheitelwerte) der Messgröße genannt.

Jeder, der einen Wechselstrom- oder eine Wechselspannung misst, also jede Elektrofachkraft, muss somit wissen, ob das von ihm zur Messung verwendete Messgerät tatsächlich auch den Effektivwert der von ihm zu messenden Wechselgröße misst und anzeigt. Er muss auch wissen, welche Bedeutung die Bezeichnung „Effektivwert“ eigentlich hat.

Der Effektivwert eines Wechselstroms beispielsweise – dies gilt analog auch für eine Wechselspannung – entspricht dem Wert eines Gleichstroms (einer Gleichspannung), der an einer ohmschen Last die gleiche Wärme-/Heizleistung bewirkt wie dieser Wechselstrom (Bild 1).

Der Effektivwert eines nicht sinusförmigen Wechselstroms ergibt sich aus der quadratischen Summe der Effektivwerte (siehe Kästen) seiner Grundschwingung und aller seiner Oberschwingungen.

Das heißt, da es beim Messen von Wechselströmen/-spannungen – mit wenigen Ausnahmen – immer darum geht, die thermische Belastung (Verlustleistung) z. B. von (in) Kabeln, Leitungen, Wicklungen, Bauelementen zu ermitteln, ist es immer erforderlich, den Effektivwert von Wechselstrom/-spannung zu messen. Das heißt auch, wer immer richtig messen will, ohne sich im Detail über die in der Messgröße vorhandenen Oberschwingungen und den außerdem möglicherweise vorhandenen Gleichstromanteil kümmern zu müssen, sollte immer ein Messmittel verwenden, das den Effektivwert direkt messen kann und anzeigt



1 Zusammenhang von Scheitel-, Mittel- und Effektivwert einer sinusförmigen Größe

Autor

Dipl.-Ing. Klaus Bödeker ist freier Fachautor, Berlin, Robert Kindermann ist Mitarbeiter der Firma Gossen-Metrawatt, Nürnberg.



2 Mehrere DMM mit unterschiedlichen Bezeichnungen (GMC)

(Typen RMS und TRMS AC + DC; Tafel 1 und Bild 2).

Wird ein MM mit Mittelwertgleichrichtung (Typ MW, Tafel 1) verwendet, so muss immer wieder – vor jeder neuen Messaufgabe – überlegt werden, ob es für das Messen der jeweiligen Messgröße überhaupt geeignet ist. Das heißt, ob in der Messgröße ein Oberschwingungs- und/oder ein DC-Anteil vorhanden ist.

3 Erfassen des Effektivwerts

3.1 Indirekte Effektivwertmessung

In der Vergangenheit konnte bei den Messungen in Starkstromanlagen vorausgesetzt werden, dass Wechselströme und Wechselspannungen praktisch sinusförmig sind. Der Anteil der natürlich auch damals schon vorhandenen Oberschwingungen war im Rahmen der bei diesen Orientierungsmessungen geforderten Genauigkeit zu vernachlässigen. Es genügte somit, relativ einfache, preiswerte MM zu verwenden, die den arithmetischen Mittelwert (siehe Kasten) einer Wechselgröße messen, deren Anzeige jedoch auf den Effektivwert kalibriert ist. Somit wurde immer ein um den Faktor 1,1107 erhöhter Wert auf der Skale bzw. dem Display angezeigt (indirekte Effektivwertmessung).

Diese Verfahrensweise war und ist möglich, da bei einer Wechselgröße mit unverzerrter Sinusform zwischen dem Effektivwert und dem arithmetischen Mittelwert (Gleichrichtwert) ein fester zahlenmäßiger Zusammenhang besteht. Er wird als Formfaktor bezeichnet und hat den Wert von 1,1107 (siehe Kasten).

Das heißt einerseits:

MM, bei denen diese Verfahrensweise der Messung des arithmetischen Mittelwerts und dann der indirekten Bestimmung des Effektivwerts angewandt wurde, waren und sind auch heute nur für Messungen von praktisch sinusförmigen Wechselgrößen geeignet.

Das heißt aber andererseits auch:

Diese MM sind dort anwendbar, wo es bei einem geringen Überlagerungsanteil von Oberwellen oder Störspannungen auf den Grundwellenanteil der Sinusgröße ankommt, z. B.

- beim Bewerten der mechanischen Leistung bzw. des Drehmoments eines Elektromotors und bei anderen Arten der Erzeugung magnetischer Kräfte sowie
- um das Feststellen des Ladestroms einer Batterie oder des Laststroms von Verbrauchsgütern mit ausschließlich ohmschen Widerständen.

Anstatt der Bezeichnung „arithmetischer Mittelwert“ ist auch die Bezeichnung „Gleichrichtwert“ üblich (siehe Kasten). Wie sie zustande kommt ist im Bild 1 zu erkennen.

Wegen des geringen Aufwands für die hier eingesetzten Gleichrichterschaltungen ist dieses Verfahren, die so genannte „Mittelwert-Gleichrichtung“, zu finden bei

- allen analogen MM – hier werden zum Ermitteln des Mittelwerts die bei der Spulenbewegung vorhandene Trägheit und Dämpfung – und
- den digitalen MM der niedrigeren Preisklassen.

Zu erkennen sind diese MM in der Regel daran, dass sie keine der in Tafel 1 angegebenen Kennzeichnungen aufweisen.

3.2 Direkte Effektivwertmessung

Die direkte Messung von Effektivwerten erfolgt etwa seit den Jahren um 1980 durch

MM mit vollintegrierten ICs. Diese können den Effektivwert auf der Basis der Analogrechenstechnik mehr oder minder präzise bestimmen. Wegen des damit verbundenen höheren Aufwands wird diese Effektivwertbestimmung nur bei MM der höheren Preisklasse verwendet. Sie werden entsprechend ihrer technischen Ausführung mit TRMS bzw. TRMS AC oder TRMS AC+DC bezeichnet (Tafel 1).

Zur direkten messtechnischen Erfassung von Effektivwerten eignen sich aus der klassischen Messtechnik für den Starkstrombereich ebenfalls

- die traditionellen Messgeräte mit Thermumformern (sie werden bei Wechselgrößen angewandt, die Anteile mit hohen Frequenzen aufweisen und trotzdem eine sehr hohe Genauigkeit des Messwerts gefordert wird),
- die nach ihrem konstruktiven Prinzip so genannten Dreheisen-Messinstrumente (die das Messwerk/den Zeiger bewegende Kraft ist proportional zum Quadrat des Stroms) und
- die so genannten Hitzdraht-Messinstrumente (die Auslenkung des Zeigers ist proportional der Erwärmung/Längenänderung eines Bauteils und damit proportional zum Quadrat des erwärmenden Stroms).

Fachausdrücke, Definitionen

Mittelwert – Durchschnitt aller Momentanwerte z. B. des Stroms (arithmetischer Mittelwert) – auch Gleichrichtwert

$$I_M = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N}{N}$$

Effektivwert – Durchschnitt der Wirkungen (Wärmeleistung) z. B. des Stroms

$$I_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}}{N}$$

Mittelwertgleichrichtung – Ermitteln des Mittelwerts eines Wechselstroms, indem dieser mit einer idealen Gleichrichterschaltung in einen Gleichstrom umgewandelt wird.

Messfehler, Messabweichung, Messgenauigkeit, Genauigkeit – bisher übliche Bezeichnung für die Differenz zwischen

- dem vom Messgerät angezeigten Wert (Messwert) und
- dem tatsächlichen Wert („richtiger Wert, Istwert“) der Messgröße.

Messunsicherheit – neu eingeführte Bezeichnung für die Angabe der Genauigkeit der Messung bzw. des Messwerts.
(Ersetzt die oben angeführten Bezeichnungen Messfehler, Messabweichung usw.)

Eigenunsicherheit (Eigenabweichung) – Messunsicherheit (Messfehler) eines Messgerätes beim Betrieb unter Referenzbedingungen.

Referenzbedingungen – geeignete Menge festgelegter Werte und/oder Wertebereiche von Einflussgrößen, bei deren Vorhandensein die geringsten für das Messgerät angebenen (festgelegten) Messunsicherheiten (Messfehler) gelten (Beispiel bei MM u.a.: Umgebungstemperatur 23 °C ± K, Frequenz der Messgröße 45 bis 46 Hz).

Crestfaktor (Scheitelfaktor) – Verhältnis des Spitzwertes einer Wechselgröße zu ihrem Effektivwert. Maß für die Höhe der Verzerrung der Messgröße.

$$\text{Crestfaktor} = \frac{\text{Spitzenwert}}{\text{Effektivwert}}$$

Formfaktor – Verhältnis des Effektivwerts einer Wechselgröße zu ihrem Mittelwert

$$\text{Formfaktor} = \frac{\text{Effektivwert}}{\text{arithmetischer Mittelwert (Gleichrichtwert)}}$$

Bandbreite (Frequenzbereich) eines Multimeters – Bereich der Frequenzen der Oberschwingungen einer Messgröße, die von dem betreffenden Multimeter verarbeitet werden können, ohne dass die angegebene Messunsicherheit (Messfehler) überschritten wird.

4 Grenzen der Effektivwertbestimmung

Auch für die MM mit der Kennzeichnung „TRMS“ bzw. „TRMS AC“ oder „TRMS AC+DC“ gibt es hinsichtlich der Merkmale der zu messenden Wechselgrößen einige durch ihren Aufbau (Kosten, Größe) bedingte Grenzen, die nicht überschritten werden dürfen, wenn genau genug gemessen werden soll.

Zunächst ist zu beachten, dass der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen den Kennwerten

- Effektivwert,
- arithmetischer Mittelwert und
- Scheitelwert(Spitzenwert)

bei jeder Form der Wechselgröße ein anderer ist. Nur bei einem reinen Sinusverlauf gelten die im Bild 1 angeführten Werte. Bereits bei leichten Verzerrungen der Sinusform stimmen

- der dort genannte Wert 1,111 für den Zusammenhang zwischen Effektivwert und Mittelwert sowie
- damit die für eine reine Sinusform ausgelegte Kalibrierung des Anzeigewerts nicht mehr. Es entsteht ein weiterer Messfehler, zusätzlich zu dem, der ohnehin beim Messen reiner Sinusgrößen vorhanden ist.

Da in den Versorgungsnetzen mit dem Einsatz moderner Gebrauchsgeräte zunehmend Spannungs-/Stromverläufe entstehen, die keinen idealen Sinusverlauf aufweisen, kann die Verwendung der noch vielfach bei Elektrofachkräften vorhandenen MM mit dieser für reine Sinusform ausgelegten **Mittelwert-Gleichrichtung** zu erheblichen Falschaussagen führen. Sind solche MM noch vorhanden, so kommt es bei den Prüfungen/Messungen dann meist unweigerlich zu ihrer Anwendung. Ermittelt werden dann nicht die gewünschten Effektivwerte, sondern die kleineren Mittelwerte von Strom oder Spannung. Ein fataler und möglicherweise verhängnisvoller Fehler. Er führt zu einer falschen Bewertung des Messobjekts und zu „betriebsmäßigen“ Überlastungen von Leitungen. Die tatsächlich entstehenden Verluste, Erwärmungen und Brandursachen in den Leitungen werden nicht erkannt. Wer solche „Mittelwert-MM“ neben den „Effektivwert-MM“ weiterhin anwenden will, sollte sie deutlich und unverwechselbar kennzeichnen.

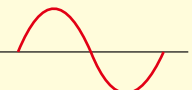

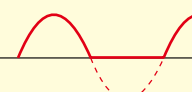
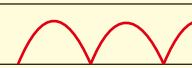
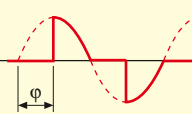
Als Beispiele für Betriebsmittel, die als Ursache der Verunreinigung in Versorgungsnetzen anzusehen sind, seien genannt:

- elektronische Frequenzumrichter und Konverter (PC) mit höherfrequenten Anteilen in den Eingangs- /Ausgangsspannungen bzw. -strömen
- Niedervolt-Beleuchtungsanlagen
- Dimmersteuerungen
- Kleingeräte in Industrie, Gewerbe und Haushalt mit Einweggleichrichtern und dem zufolge Gleichanteilen in der Messgröße.

Tafel 1 Erläuterung der Kurzbezeichnungen von digitalen Messgeräten, der für die Anzeige der Effektivwerte geeignet sind (Bild 2)

Achtung! Es existieren keine genormten Bezeichnungen für diese Kennwerte, so dass in den Katalogen der Hersteller sehr unterschiedliche Angaben zu finden sind.

Kennzeichnung auf dem DMM	Informationen durch die Kennzeichnung
meist keine Angaben (mitunter MW oder AVR)	<ul style="list-style-type: none"> • ermittelt wird der arithmetische Mittelwert (Gleichrichtwert) • der angezeigte Messwert ist nur dann der Effektivwert der Messgröße, wenn es sich um eine reine Sinusgröße handelt
RMS	<ul style="list-style-type: none"> • ermittelt wird der quadratische Mittelwert (Root Mean Square) also der Effektivwert • der angezeigte Messwert ist der Effektivwert, bei dem neben der Grundschiwingung auch die Oberschwingungen und der etwaige Gleichanteil berücksichtigt werden
TRMS oder TRMS AC	<ul style="list-style-type: none"> • ermittelt wird der Effektivwert (True-RMS → echt effektiv); (ursprünglich Werbebegriff der Fa. Fluke, der jetzt allgemein verwendet wird) • der angezeigte Messwert ist der Effektivwert, bei dem neben der Grundschiwingung auch die Oberschwingungen, aber nicht ein etwaiger Gleichanteil berücksichtigt werden
TRMS AC+DC	<ul style="list-style-type: none"> • identisch mit RMS, • der angezeigte Wert ist der Effektivwert wie bei RMS, es wird mit der Bezeichnung nochmals verdeutlicht, dass beim Ermitteln des Effektivwerts auch die DC- und AC-Anteile berücksichtigt werden

Quelle	Kurvenform der Wechselgröße	Anzeigefehler beim Messen mit einem DMM Typ MW (siehe Tafel 2)	Crestfaktor
idealer Generator mit (ideal) sinusförmiger Spannung		0 %	1,414
Rechteck-generator		+ 11,1 %	1,0
Halbwellengleichrichter		- 22,2 %	2,0
Vollwellengleichrichter		- 57,8 %	1,414
Anschnittsteuerung		je nach Aussteuerung $\varphi = 45^\circ$ - 10,5 % $\varphi = 90^\circ$ - 29,3 % $\varphi = 135^\circ$ - 51,5 %	1,24 1,54 2,236

3 Auswirkungen der Kurvenformen auf den Anzeigewert bei einem Messgerät, das ausschließlich für das Messen von sinusförmigen Größen vorgesehen ist (Typ MW)

Hinzu kommt, dass die nicht sinusförmigen Ströme derartiger Geräte im gesamten Netz wiederum für entsprechende Spannungsfälle an den Leitungswiderständen/-induktivitäten und somit für mehr oder weniger verzerrte Betriebsspannungen der anderen Betriebsmittel sorgen. Natürlich sind dann überall auch die dort eingesetzten Multimeter davon betroffen. Ein verhängnisvoller Kreislauf, dem nur durch den Einsatz von Netzfiltern begegnet werden kann. Im Bild 3 werden beispielhaft die Messfehler genannt, die sich bei einigen typischen Spannungs-/Stromverläufen ergeben, wenn kein effektivwerttaugliches MM eingesetzt wird. Um das Risiko von Fehlmessungen zu vermeiden ist es daher ratsam, nur MM mit Effektiv-

wertbewertung zu verwenden. Dann ist gewährleistet, dass bei jeder Wechselgröße – unabhängig von der Signalform – der tatsächliche Effektivwert der Messgröße angezeigt wird.

Literatur

- [1] Bödeker, K.; Kindermann, R.: Sicheres Messen mit Multimetern – Normgerechte Multimeter, ordnungsgemäßes Bedienen. Elektropraktiker, Berlin 59(2005)9, S. 702-705.
- [2] Bödeker, K.; Kindermann, R.: Sicheres Messen mit Multimetern – Vergleich der Merkmale, Messen von Strömen und Spannungen. Elektropraktiker, Berlin 59(2005)10, S. 782-785.
- [3] Bödeker, K.; Kindermann, R.: Sicheres Messen mit Multimetern – Sicheres und genaues Durchführen von Messungen. Elektropraktiker, Berlin 60(2006)1, S. 48-51.