

Dynamische Vorgänge in Schaltnetzteilen erfassen:

Leistungsmessung – aber wie?

Voraussetzung für das Design energieeffizienter Geräte ist, dass die Energieaufnahme eines Gerätes genau gemessen werden kann. Um in der Designphase die Wirksamkeit der Entwürfe auch im Inneren der Geräte nachzuvollziehen, gibt eine ganze Reihe von gängigen Messgeräten oder Messkonzepten, die aber alle ihre Vor- und Nachteile haben.

von Klaus Höing



(Bild: Alhovic – Shutterstock)

Unter dem Begriff „Effektivität“ bei elektrischen Geräten versteht man, wie gut die Umwandlung von elektrischer Eingangs-Energie in eine Ausgangs-Energie implementiert wurde. Je effektiver dieser Umwandlungsprozess ist, desto weniger Leistung wird vergeudet, was sich je nach Anwendung in geringerem finanziellen Aufwand beziehungsweise auch in längerer Batterielebensdauer widerspiegelt. Akkus müssen nicht so oft nachgeladen werden, Produkt-Abmessungen können reduziert werden, da weniger Wärme abgeführt werden muss, Zusatzaufwendungen für Ventilatoren etc. entfallen – ganz abgesehen von der Umweltbelastung, die eine vergeudete Leistung bei Zigtausenden von denselben Produkten mit sich bringen würde. Gesetzgeber schreiben mittlerweile vor, wie hoch die maximal aufgenommene Leistung zum Beispiel bei Haushaltsgeräten sein darf. Als Beispiel sei die „Delegierte Verordnung (EU) Nr. 665/2013 der Kommission vom 3. Mai 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieverbrauchskennzeichnung von Staubsaugern“ [1] zitiert. Zudem gibt es noch eine Reihe von Energie-Labels, die neben der Leistungsaufnahme auch die qualitativen Leistungen der Geräte beurteilen. Allen ist jedoch eines gemein: Die aufgenommene und die ab-

gegebene elektrische Wirkleistung müssen genau gemessen und der Wirkungsgrad η nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\eta = \frac{\text{Ausgangswirkleistung}}{\text{Eingangswirkleistung}} \quad (1)$$

Das Ziel, eine 100%ige Effektivität zu erreichen, ist unmöglich, da der Umwandlungsprozess bereits etwas Energie benötigt.

Wie kann die Messung der Leistung durchgeführt werden?

Es gibt einige Methoden, wie Wirkleistungen gemessen werden können:

- Multimeter
- Oszilloskope
- Leistungsanalysatoren

Die beiden ersten Methoden haben ihre Vor- und Nachteile.

Messungen mit dem Digitalmultimeter

Die Leistungen von Gleichspannungsanwendungen sind sehr einfach mit dem Multimeter zu messen. Bei Wechselspannungen ist es aber nicht mehr trivial.

Um die momentan aufgenommene Leistung $p(t)$ zu erhalten, muss sowohl die momentane Spannung $u(t)$ als auch der momentane Strom $i(t)$ gleichzeitig

gemessen werden. Da sich aber die momentan aufgenommene Leistung über der Zeit ändert, muss eine Durchschnittsleistung durch Integration über ein ganzzahliges Vielfaches an Zyklen (Perioden) und durch Division durch die Integrationszeit T bestimmt werden. Die Durchschnittsleistung über eine Periodendauer T berechnet sich damit zu

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2)$$

Es ist also die Durchschnittsleistung über eine Periode zu berechnen – nicht der Effektivwert (oder Root Mean Square/RMS-Wert/quadratische Mittelwert).

Die momentane Leistung – vorausgesetzt, Strom und Spannung haben sinusförmigen Verlauf – berechnet sich zu

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \cdot \hat{i} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

Mit Formel 4 und 5 ergibt sich:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} \quad (4)$$

$$\hat{i} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}} \quad (5)$$

$$p(t) = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} \cdot \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

φ ist der Winkel zwischen Wirk- und Scheinleistung, bedingt durch das Vor-

Nacheilen des Stromes bei kapazitiver oder induktiver Last.

Für die trigonometrischen Funktionen gilt Formel 7:

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

Damit ergibt sich

$$p(t) = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (8)$$

oder aufgelöst (9)

$$p(t) = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi - U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$$

Der erste Term beschreibt die Wirkleistung P , die konstant ist, aber von φ abhängt. Der zweite Term ist die Scheinleistung $S(t)$, die die doppelte Frequenz von Spannung und Strom hat und um φ phasenverschoben ist. Man vergleiche hierzu auch Bild 3: Der untere Sinuszug (grün) auf dem Display hat die doppelte Frequenz.

Bild 6 zeigt einen Stromverlauf, der nur zum Zeitpunkt des Einschaltens einen fast sinusförmigen Verlauf für die 1. Halbwelle zeigt; alle weiteren Halbwellen sind nur Sinus-Segmente. Damit gilt obige Formel nicht mehr, vielmehr muss für diesen Fall die Integration über die Anzahl von n Perioden durchgeführt werden. Ein Digitalmultimeter würde in diesem Fall nur „Hausnummern“ anzeigen.

Der Spezialfall, wenn ein rein ohmscher Verbraucher angeschlossen ist und keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung existiert, ist $\varphi = 0$; das heißt $\cos \varphi = 1$. Nur in diesem Fall ist die Multiplikation vom Effektivstrom mit der Effektivspannung zur Ermittlung der Wirkleistung zulässig, wenn die beiden Werte mit einem Digitalmultimeter gemessen werden. Stillschweigend wird vorausgesetzt, dass sich zwischen Spannungsmessung und Strommessung die nominellen Amplitudenwerte nicht geändert haben.

Dies für den Einstieg zur Erinnerung. Denn oft werden in der Praxis die Effektivwerte von Spannung und Strom mit dem Digitalmultimeter gemessen und multipliziert – und schon hat sich ein möglicher Fehler eingeschlichen.

Messung mit einem Oszilloskop

Da die Messung der momentanen Leistung mit anschließender Durchschnitts-

wertbildung das simultane Messen von Spannung und Strom voraussetzt, sind Oszilloskope grundsätzlich dafür geeignet. Mit speziellen Tastköpfen und Stromzangen lassen sich die zeitlichen Bezüge von Spannung und Strom herstellen und sichtbar machen. Eine wirkliche Leistungsmessung ist damit aber immer noch nicht durchgeführt. Manche Oszilloskope bieten auch Mathematikfunktionen, mit denen sich zwei Kurvenzüge messpunktweise multiplizieren lassen. Man erhält dadurch eine zeitabhängige Scheinleistungskurve (Messpunkte in VA) und nicht direkt die Wirkleistung. Verfügt das Oszilloskop über die mathematische Funktion der Durchschnittsbildung dieses Kurvenzuges, so kann sie zur Berechnung der Wirkleistung in Watt herangezogen werden. Für ein genaues Ergebnis muss darauf geachtet werden, dass sich die Durchschnittsbildung genau über eine ganzzahlige Anzahl an Perioden erstreckt. In der Praxis müssen vom Oszilloskop vier Kanäle belegt werden – für die Eingangsgrößen Spannung und Strom und ebenso für die Ausgangsgrößen. Aus diesen Größen lässt sich dann der Wirkungsgrad berechnen. Das in **Bild 1** dargestellte Os-

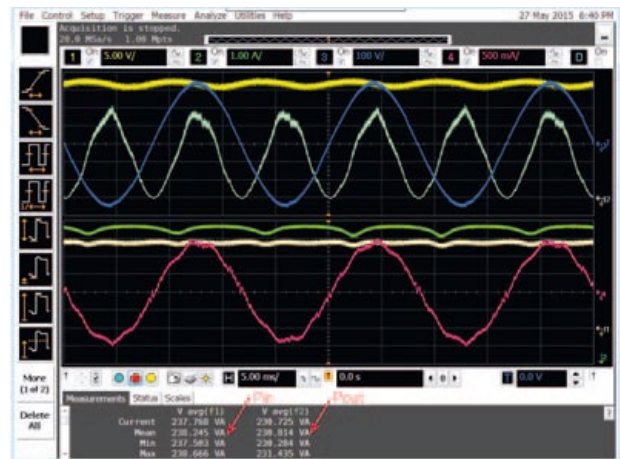


Bild 1. Oszilloskop-Screenshot mit Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgrößen wie Spannung und Strom zur Berechnung der Eingangsleistung und Ausgangsleistung. (Bild: datatec)

zilloskop-Display zeigt die Messgrößen. Die Leistungskurve ist deutlich an der doppelten Frequenz zu erkennen.

Bei einigen Oszilloskopen lassen sich spezielle Leistungsmess-Optionen integrieren, die die Messaufnahme und Messdurchführung, die Leistungsbeurteilung wie auch die Messwertdarstellung deutlich vereinfachen. So zum Beispiel bei den Oszilloskopen der InfiniiVision 4000- und 6000-X-Serien von Keysight.

Mit den Oszilloskopen lassen sich zum Beispiel die Leistungskennwerte auch innerhalb des Konverters sehr gut ermitteln, sodass die Verluststränge wesentlich leichter innerhalb einer Schaltung identifiziert werden können.

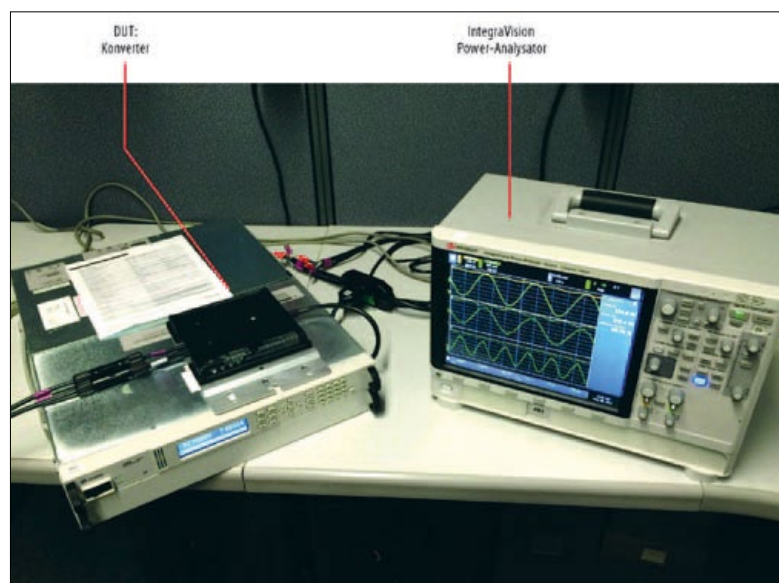


Bild 2. Messaufbau mit dem IntegraVision PA2201A von Keysight. Pro Kanal wird die Spannung und über entsprechende Shuntwiderstände der Strom gemessen. (Bild: datatec)

Mit diesen Optionen sind vor allem Analysen in höherfrequenten Schalt- netzteilen und Schaltungen möglich, um Aussagen über die Zuverlässigkeit, Leistung und Effektivität der Bauteile und Module und deren Schaltverluste treffen zu können.

Oszilloskope bieten – je nach Modell – zwar eine hohe Bandbreite, sind aber aufgrund der 8-bit-Vertikalauflo- sung zur reinen Spannungsmessung nur bedingt oder nur mit eingeschränkter Genauigkeit nutzbar. Ferner haben die

durchzuführen. Typischerweise haben derartige Geräte isolierte Eingänge zur simultanen Messung von Spannung und Strom, um die Leistungsaufnahme und -abgabe eines DUT zu erfassen. Die Leistungsangaben erfolgen dann direkt in Watt und der Wirkungsgrad wird direkt durch die Division der durchschnittlichen Ausgangsleistung durch die Eingangsleistung ermittelt. Die Messbandbreite, meist nicht so hoch wie bei Oszilloskopen, ist jedoch so ausgelegt, dass die Grundwelle bei

breite von 2 MHz und mit einer Grund- genauigkeit von 0,05 %. Die Eingänge sind bis $\pm 1000\text{ V}$ – bezogen auf Masse – belastbar und kommen ohne Diffe- renzstastköpfe aus. Jeder Kanal verfügt über den Spannungseingang, zwei Shunt-Eingänge (2 A und 50 A RMS) zur Strommessung und zusätzlich einen BNC-Eingang für Messungen mit einer Stromzange. Dies ermöglicht die Mes- sung von noch größeren Strömen. Mit diesem System lassen sich genaue Messungen durchführen.



Bild 3. Screenshot vom IntegraVision PA2201A zur Messung des Konverters. Die tabel- larische Zusammenstellung der Messergebnisse gibt Auskunft über den Wirkungsgrad und die Wirkleistungen nebst den anderen Charakteristika. (Bild: datatec)

50 Hz oder 60 Hz nebst den Harmo- nischen erfasst wird. Auch 400-Hz- Netzsysteme nebst Oberwellen kön- nen damit gemes- sen werden.

Ferner weisen die Leistungsanaly- satoren eine besse- re Messgenauigkeit auf, indem sie mit 16 bit Auflösung aufwarten, vergli- chen mit den 8 bit eines Oszilloskops.

Der Leistungs- analysator Integra- Vision PA2201A

enthält alle notwendigen Merkmale zur Messung und Darstellung der Leistung und des Wirkungsgrades. Es werden sowohl die Spannung als auch der Strom pro Kanal gemessen und für die Anwendung aus dem obigen Beispiel auch die insgesamt sechs Kurven, also sowohl die Eingangsleistung als auch die Ausgangsleistung, dargestellt. Die Messdatenaufnahme erfolgt mit 5 MS/s bei einer 16 bit-Auflösung, einer Band-

Bild 2 und 3 zeigen eine Wirkungs- grad- und Leistungsmessung am selben Konverter wie oben, jedoch mit dem Leistungsanalysator IntegraVision. Auf- fallend ist der wesentlich elegantere Messaufbau – ohne die zusätzlichen Fehlermöglichkeiten und die kostspie- ligeren Differenzstastköpfe. Die Strom- messung erfolgt über den Strommess- pfad mit den integrierten Shunt-Wider- ständen. Das Display des IntegraVision zeigt die Spannung, den Strom und die Leistung am Ein- und Ausgang des Konverters ohne die Notwendigkeit einer Konfiguration der einzelnen Mess- kurven mit Hilfe der Mathematikfunk- tionen, wie es bei der Messung mit ei- nem Oszilloskop notwendig ist. Aus diesen Messkurven wird direkt der Wirkungsgrad bestimmt und in diesem Beispiel zu 96,05 % angegeben.

Zusätzlich zu den fundamentalen Daten wie Wirkleistungen und Wir- kungsgrad gibt der Analysator auch weitere Messwerte von Charakteristika an, wie Scheinleistung (Complex Power) in VA, Blindleistung (Reactive Power) VAR, Leistungsfaktor oder Wirklei- stungsfaktor = Wirk-/Scheinleistung (Power Factor) PF, den Crest Factor für Spannung und Strom, Arbeit bezie-

Scopes einen massebezogenen Ein- gang, wodurch Differenzstastköpfe genutzt werden müssen, was den Aufbau verkompliziert und zu möglichen Fehlern führen kann. Stromzangen für die Strommessung sind nur bis in den unteren %-Bereich genau und neigen zu Driften, wodurch sie vor Messungen entmagnetisiert und Null- abgleiche durchgeführt werden müs- sen. Strom- und Spannungsmessung müssen auch hier zum gleichen Zeit- punkt erfolgen; daher ist auf Laufzeit- unterschiede von langen Leitungen zu achten, vor allem, wenn hohe Spitzen oder Umladevorgänge von Spulen und Kondensatoren eine Rolle spielen. Bei geringen Frequenzen wie bei den normalen Netzfrequenzen von 50 Hz oder 60 Hz ist das allerdings keine Herausforderung.

Leistungsanalysatoren

Leistungsanalysatoren wurden entwor- fen, um einfach und leicht genaue Messungen der Leistungen beziehungsweise des Wirkungsgrades

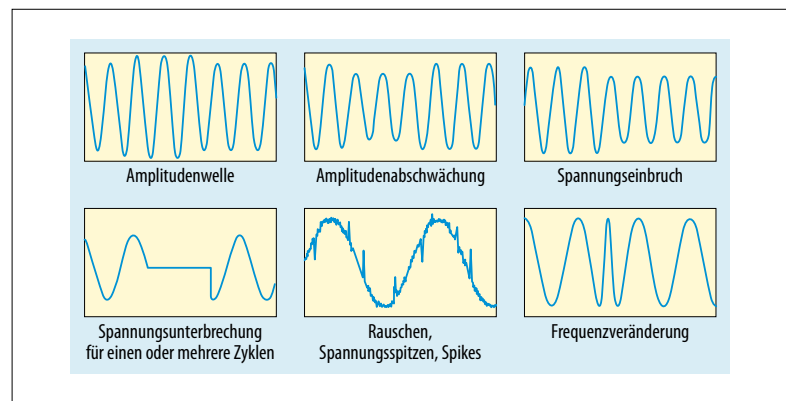


Bild 4. Typische Beeinflussungen einer Netzversorgung oder einer im Gerät befindlichen Versorgung durch Laständerungen beziehungsweise Aussetzer. (Quelle: datatec)



Bild 5. Mit einem Kanal des IntegraVision PA2201A lässt sich dieser primärseitige Dropout der AC-Versorgungsspannung für ein DC-Netzgerät (gelbe Kurve) aufnehmen und gleichzeitig der Spannungseinbruch von ca. 600 mV und die Einschwingzeit von ca. 10 ms auf der 20V-DC-Seite darstellen. (Bild: dataTec)

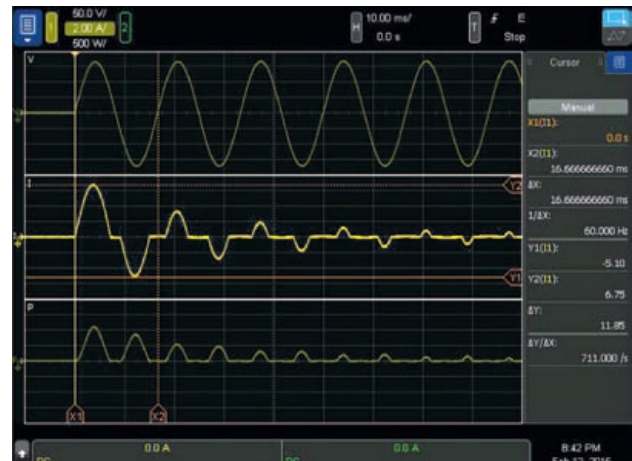


Bild 6. Einschaltstrom und die Eingangsleistung, die ein DUT nach dem Einschalten aufnimmt. Der Cursor (Y2) zeigt eine Stromspitze von 6,75 A im ersten Zyklus. (Bild: dataTec)

hungsweise Energie in Wh und elektrische Ladung in Ah, die Phasenbeziehung (zwischen Schein- und Wirkleistung) sowie die Harmonischen. Ferner lassen sich mit dem Leistungsanalysator wie in Bild 3 Spannung und Strom in Echtzeit anzeigen, inklusive Spannungseinbrüchen, Leistungseinbrüchen, Stromstößen und Stromabsenkungen, Zyklenausfällen und Einschaltströmen.

Einige Module oder Schaltungen bewirken während ihres Betriebes Rückwirkungen auf die Netzversorgung oder auf die im Gerät verwirklichte Spannungsversorgung der einzelnen Komponenten, wie zum Beispiel durch das Einschalten des Monitors aus dem „Power-Save-Modus“ in den „Full-Power-Display-Modus“. So kann dieser unterschiedliche Strombedarf zu erheblichen Spannungseinbrüchen innerhalb des Gerätes führen. Einige Arten dieser Veränderungen sind in Bild 4 dargestellt.

Derartige Veränderungen müssen bei der Produktentwicklung einerseits simuliert werden, andererseits muss das

DUT entsprechend den Spezifikationen derartige Versorgungsänderungen aushalten. Eventuell muss das DUT nach einer derartigen Störung selbstständig wieder anfahren. Dies alles gilt es zu prüfen. Es gibt eine Vielzahl an Netzgeräten, mit denen derartige Netzveränderungen simuliert werden können, so zum Beispiel von Chroma, Keysight oder Elektro-Automatik. Wird das DUT an Versorgungssystemen mit Netzfrequenzen bis 400 Hz oder darüber angeschlossen, muss es entsprechend getestet werden. Mit einfachen Leistungsanalysatoren stößt man hier an die Grenzen.

Dynamische Untersuchungen sind unabdingbar, wie obige Beispiele zeigen. Ein Leistungsanalysator muss das können, obwohl er nicht die Bandbreite eines guten Oszilloskops erreicht. Jedoch ist für das Erfassen von Netzspitzen eine Bandbreite von 2 MHz ausreichend. Bild 5 zeigt einen derartigen Fall am Beispiel eines Zyklusaussetzers mit entsprechend hohem Spitzenstrom beim erneuten Anlegen der Netzspannung.

Für optimalen Trigger kann auf alle Kurvenformen, Spannung, Strom und auch die Leistung getriggert werden. Ein separater Eingang ermöglicht die externe Triggerung. Bild 6 zeigt zum Beispiel den Einschaltstrom und

die erforderliche Leistung, die ein System aufnimmt.

mh

Literatur

- [1] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0665>



Dipl.-Ing. Klaus Höing

trat nach dem Studium der Elektrotechnik in Stuttgart 1980 bei Hewlett Packard (später Agilent, jetzt Keysight Technologies), Böblingen, in den Entwicklungsbereich für Messtechnik ein. 1998 wechselte er in den Bereich Computertechnik bei Hewlett Packard als PR-Manager für die deutsche Niederlassung. Seit dem Frühjahr 2012 ist er bei der Firma dataTec in Reutlingen mit PR-Aufgaben betraut.

Seit dem Frühjahr 2012 ist er bei der Firma dataTec in Reutlingen mit PR-Aufgaben betraut.