

Messtechnik

# Oszilloskopmessung der Verlustleistung bei Schaltnetzgeräten

Der Artikel beschreibt, wie die wichtigsten Parameter von Schaltnetzteilen mithilfe eines Digital-Phosphor-Oszilloskops (DPO) und geeigneter Leistungsmessungssoftware gemessen und analysiert werden können.

Mit dem Bedarf nach leistungsoptimierenden Änderungen der Architektur geschalteter Stromversorgungen gewinnt die Messung und Analyse der Verlustleistung bei Schaltnetzteilen der nächsten Generation immer mehr an Bedeutung. Neue Stromversorgungsarchitekturen mit erheblich höheren Datengeschwindigkeiten und Prozessoren im GHz-Bereich, die eine höhere Stromstärke und niedrigere Spannung benötigen, stellen Netzteilentwickler im Hinblick auf Effizienz, Leistungsdichte, Zuverlässigkeit und Kosten vor neue Herausforderungen. Als Reaktion darauf werden neue Architekturen mit Synchron-Gleichrichtern, aktiver Leistungsfaktorkorrektur und höheren Schaltfrequenzen implementiert – Techniken, die ihrerseits neue Probleme wie hohe Verlustleistung am Schaltelement, thermische Instabilität und unerwünschte EMI/EMV-Effekte mit sich bringen.

Einer der wichtigsten Parameter zum Verständnis dieser Effekte ist der Leistungsverlust, der während des Schaltvorgangs auftritt. Beim Wechsel von Aus auf Ein hat das Netzteil einen höheren Leistungsverlust. Im ein- oder ausgeschalteten Zustand ist der Leistungsverlust am Schaltelement geringer, da nur wenig Strom durch das Element fließt bzw. dort nur eine niedrige Spannung anliegt. Die zum Schaltelement gehörenden Drosselspulen und Transformatoren isolieren die Ausgangsspannung und reduzieren den Arbeitsstrom. Diese Drosselspulen und Transformatoren sind ebenfalls Schaltfrequenzen ausgesetzt, die zu Verlustleistung und gelegentlichen sättigungs-

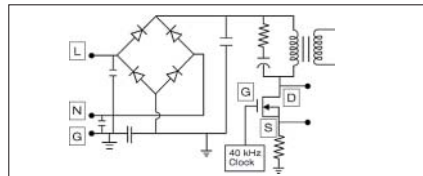


Bild 1: Vereinfachte Schaltung eines Schaltnetzteils



Bild 2: Laufzeitverzögerung bei einem Spannungs- und Stromsignal

bedingten Funktionsstörungen führen. Da die in einem Schaltnetzteil abgegebene Leistung den Gesamtwirkungsgrad der Stromversorgung und die darauf einwirkende Wärme bestimmt, ist die Messung des Leistungsverlusts am Schaltelement sowie an den Drosselspulen und Transformatoren von großer Bedeutung – insbesondere aufgrund ihrer Aussagekraft für die Leistungseffizienz und thermische Instabilität. Ingenieure benötigen deshalb Mess- und Analysensysteme, mit denen sie die Augenblicksverlustleistung unter wechselnden Lastbedingungen präzise bestimmen und analysieren können.

Die präzise Messung und Analyse der Augenblicksverlustleistung für verschiedene Geräte ist mit den folgenden Aufgaben verbunden:

- ▶ Entwicklung eines Prüfaufbaus für eine präzise Leistungsverlustmessung

- ▶ Korrektur von Fehlern aufgrund der Laufzeitverzögerung in den Spannungs- und Stromtastköpfen
- ▶ Berechnung des Leistungsverlusts in einem nicht periodischen Schaltzyklus
- ▶ Analyse des Leistungsverlusts bei dynamischer Laständerung
- ▶ Berechnung des Kernverlusts an Drosselspule oder Transformator.

Glücklicherweise gibt es heute spezielle Leistungsanalysesoftware für die Digital-Phosphor Oszilloskope (DPOs) von Tektronix, die die gleiche Benutzeroberfläche wie das Oszilloskop hat und dadurch intuitiv und einfach zu bedienen ist. Diese Anwendungssoftware zur Leistungsmessung und analyse ermöglicht den Entwicklern von Schaltnetzteilen, genaue Leistungsverlustanalysen an den

Schaltelementen und magnetischen Komponenten sowie detaillierte Eingangs-/Ausgangsanalysen durchzuführen. Wichtigste Merkmale der Software sind der so genannte Hi-Power Finder, die Erstellung individueller Testberichte, eine Funktion zur Feststellung von Restwelligkeit, die Möglichkeit, magnetische Messungen durchzuführen, sowie ein schneller und effizienter automatischer Versatzausgleich.

## Prüfaufbau für präzise Verlustleistungsmessung

Bild 1 zeigt den vereinfachten Schaltkreis eines Schaltnetzteils. Der Stromfluss wird durch einen MOSFET gesteuert, der mit 40 kHz getaktet ist. Der MOSFET ist nicht mit der Masse des Wechselstromnetzes oder der Masse am Schaltkreisausgang verbunden. Es wäre deshalb unmöglich, mit einem Oszilloskop eine einfache Spannungsmessung mit Masse als Bezugspunkt durch-

**AUTOR**



Dave Ireland ist bei Tektronix in Großbritannien Marketing Manager Design and Manufacturing für die EMEA-Region

zuführen, weil beim Anschluss der Tastkopf-Masseleitung an eine der Klemmen des MOSFET an dieser Stelle ein Masseschluss durch das Oszilloskop entsteht.

Zur Messung der Spannungssignale des MOSFET ist eine Differenzmessung am besten geeignet. Mithilfe einer Differenzmessung lässt sich die Drain-Source-Spannung (UDS) bestimmen, die je nach Leistungsbereich des Netzteils wenige zehn bis mehrere hundert Volt zusätzlich betragen kann. Zur Messung der UDS stehen mehrere Methoden zur Auswahl:

- ▶ Die Gehäusemasse des Oszilloskops trennen. Dies wird nicht empfohlen, weil dadurch die Sicherheit beeinträchtigt und Bediener, Messobjekt und Oszilloskop gefährdet werden.

- ▶ Die Masseleitungen von zwei konventionellen passiven Tastköpfen miteinander verbinden und die Mathematikfunktionen des Oszilloskop-Kanals nutzen. Diese Messung wird als „Quasi-Differenzmessung“ bezeichnet. Das Gleichtaktunterdrückungsverhältnis der passiven Tastköpfe in Kombination mit dem Oszilloskopverstärker reicht jedoch nicht aus, um Gleichtaktspannungen wirksam zu blockieren. Bei dieser Anordnung kann die Spannung nicht präzise gemessen werden; sie ermöglicht jedoch die Verwendung vorhandener Tastköpfe.

- ▶ Verwendung eines handelsüblichen Tastkopf-Isolators zur Abschirmung der

Gehäusemasse des Oszilloskops. Die Masseleitung des Tastkopfs liegt nicht mehr am Massepotential an, und der Tastkopf kann direkt an einen Prüfpunkt ange-

schlossen werden. Tastkopf-Isolatoren sind eine effektive, aber teure Lösung – zwei- bis fünfmal so teuer wie Differenzastköpfe.

- ▶ Verwendung eines echten Differenzastkopfs mit einem Breitbandoszilloskop zur präzisen Messung von UDS.

Zur Messung des Stromflusses durch den MOSFET wird zuerst die Stromzange angeklemt. Im nächsten Schritt folgt die Feinabstimmung des Messsystems. Viele Differenzastköpfe haben integrierte Trimmer zur Einstellung des DC-Offsets. Hierzu wird ohne angeschlossenes Prüfobjekt der Mittelwert der Spannungs- und Stromsignale berechnet, und zwar mit den gleichen Empfindlichkeitswerten, die später bei der tatsächlichen Messung verwendet werden. Oszilloskop und Tastköpfe müssen hierzu im „betriebswarmen“ Zustand sein. Ohne angeschlossene Signale ist der Trimmer so eingestellt, dass er den Mittelwert für jedes Signal auf 0 V abgleicht. Durch diesen Schritt wird die Wahrscheinlichkeit von Messfehlern durch Ru-

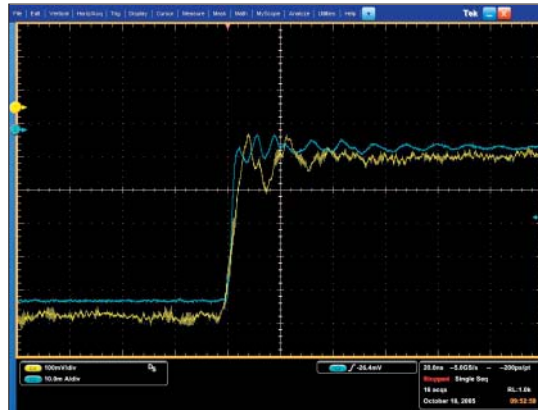


Bild 3: Das in Bild 2 dargestellte Signal nach automatischem Versatzausgleich

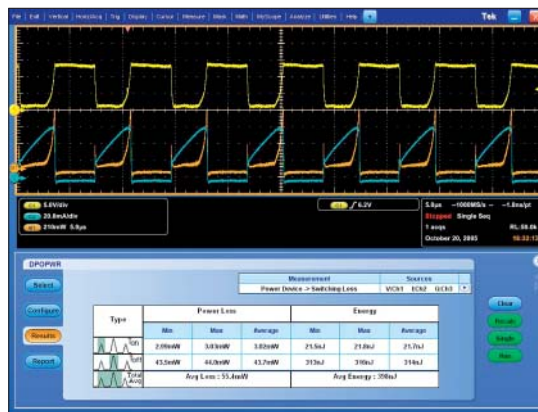


Bild 4: Kleinster, größter und durchschnittlicher Leistungsverlust beim Einschalten des Schaltelements

hespannungen und Ruhestrome im Messsystem minimiert.

## Laufzeitverzögerung in den Tastköpfen

Vor der Durchführung von Leistungsverlustmessungen an einem Schaltnetzteil ist es wichtig, die Spannungs- und Stromsignale zu synchronisieren, um Laufzeitverzögerungen zu eliminieren. Dieser Vorgang wird als „Versatzausgleich“ bezeichnet. Bei der herkömmlichen Methode berechnet man den Zeitversatz zwischen Spannungs- und Stromsignal und gibt den Versatzausgleich am Oszilloskop manuell ein. Dies ist jedoch sehr zeitaufwändig.

Der Vorgang lässt sich erheblich vereinfachen, wenn man ein breitbandiges DPO-Oszilloskop mit einer so genannten Deskew Fixture und Leistungsmessungsoftware verwendet. Zur Durchführung des Versatzausgleichs werden der Spannungs-Differenzastkopf und die Stromzange an den Prüfpunkt der Deskew Fixture angeschlossen. Diese Vorrichtung wird entweder über den Hilfsausgang oder das Kalibrierungssignal des Oszilloskops angesteuert. Auf Wunsch ist auch ein Anschluss an eine externe Quelle möglich. Die Versatzausgleichfunktion der Leistungsanalysesoftware richtet das Oszilloskop automatisch ein und berechnet die durch die Tastkopfmesung verursachte Laufzeitverzögerung. Anschließend stellt sie einen entsprechenden Versatzausgleich im Oszilloskop ein. Damit sind die Vorbereitungen zur Durchführung präziser Messungen abgeschlossen. **Bild 2** und **Bild 3** zeigen das Strom- und Spannungssignal vor und nach dem Versatzausgleich.

## Verlustleistung im nicht-periodischen Schaltsignal

Die Messung dynamischer Schaltparameter ist einfacher, wenn der Emitter oder Drain geerdet ist. Bei einer potenzialfreien



Bild 5: Kleinst-, größter und durchschnittlicher Leistungsverlust während der Lastumschaltung

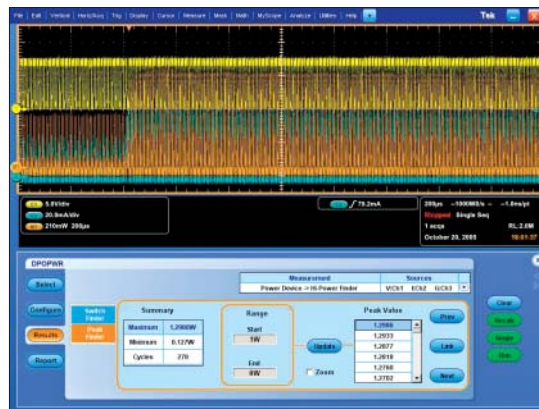


Bild 6: Nach Einsatz des HiPower Finder: das Leistungssignal am Schaltelement bei der Lastumschaltung



Bild 7: Verwendung von HiPowerFinder und Oszilloskop für weitere Analysen

Spannung muss jedoch eine Differenzspannung gemessen werden. Zur genauen Charakterisierung und Messung eines Differenzschaltsignals ist ein Differenzastkopf erforderlich. Bei einer Hall-Effekt-Stromzange kann der durch das Schaltgerät fließende Strom dargestellt werden, ohne den Stromkreis zu unterbrechen. Der automatische Versatzausgleich der Leistungsanalysesoftware eliminiert die von den Tastköpfen verursachte Laufzeitverzögerung.

Die „Umschaltverlust“-Funktion der Software berechnet automatisch das Leistungssignal und misst für die erfassten Daten den kleinsten, größten und durchschnittlichen Leistungsverlust am Schaltelement. Dies wird anschließend als Einschaltverlust, Ausschaltverlust und Leistungsverlust dargestellt, die nützliche Angaben für die Analyse der Verlustleistung am Schaltelement bilden (**Bild 4**). Wenn der Leistungsverlust beim Ein- und Ausschalten bekannt ist, können die Spannungs- und Stromübergänge so angepasst werden, dass dieser Verlust reduziert wird.

Während der Lastumschaltung ändert der Regelkreis des Schaltnetzteils die Schaltfrequenz zur Steuerung der Ausgangslast. **Bild 5** zeigt ein Leistungssignal bei Lastumschaltung. Dabei ist zu beachten, dass sich der Leistungsverlust am Schaltelement ebenfalls ändert. Das resultierende Leistungssignal ist von Natur aus nicht periodisch.

Die Analyse nicht periodischer Leistungssignale kann eine mühselige Aufgabe sein. Die fortgeschrittenen Messfunktionen der Leistungsanalysesoftware berechnen jedoch automatisch den kleinsten, größten und durchschnittlichen Leistungsverlust und liefern zusätzliche Informationen über das Schaltelement.

## Verlustleistung bei dynamischer Laständerung

In der Praxis ist die Stromversorgung ständig einer dynamischen Last ausgesetzt. Wie aus **Bild 5** hervorgeht, ändert sich der beim Umschalten auftretende Leistungsverlust ebenfalls bei einer Laständerung. Es ist äußerst wichtig, das gesamte Laständerungsereignis zu erfassen und den Umschaltverlust zu charakterisieren, um sicherzustellen, dass er das Bauelement nicht zu stark beansprucht.

Heute verwenden die meisten Entwickler ein Oszilloskop mit tiefem Speicher (2 MByte) und hoher Abtastrate, um Ereignisse mit der erforderlichen Auflösung erfassen zu können. Dies bedeutet aber auch, eine enorme Datenmenge aus den Punkten des Umschaltverlusts analysieren zu müssen. Die Funktion „HiPower Finder“ der Leistungsanalysesoftware nimmt dem Entwickler diese Arbeit ab. Ein typisches Beispiel ist in **Bild 6** dargestellt. **Bild 7** geht noch einen Schritt weiter und liefert eine Übersicht über

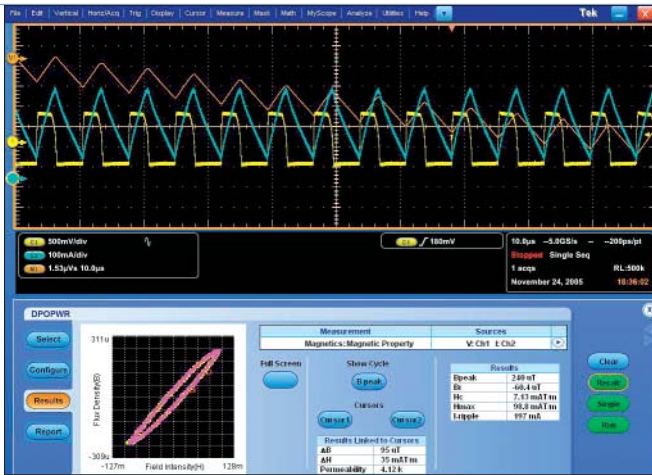


Bild 8: Sofortiges B-H-Diagramm für das erfasste Signal mit Anzeige der Cursor-Verbindung

die Anzahl der Umschalttereignisse sowie die größten und kleinsten Umschaltverluste in den erfassten Daten. Anschließend können die gewünschten Umschaltverlustpunkte durch Eingabe eines bestimmten Bereichs von Interesse genauer betrachtet werden. Der Anwender braucht nur den gewünschten Punkt auszuwählen und vom HiPower Finder in den gespeicherten Daten suchen lassen. Der Cursor wird mit dem angeforderten Bereich verbunden. Sobald die Stelle gefunden wurde, kann der Bereich um den Cursor mithilfe der Software vergrößert werden, um das Signalverhalten genauer zu untersuchen. In Kombination mit der vorher erwähnten Umschaltverlust-Funk-

tion ermöglicht dies eine schnelle und effektive Analyse der Verlustleistung am Schaltelement. Die effektivste Methode, das Verhalten des Magnetkerns zu überwachen, ist die B-H-Kurve, die schnell über das Verhalten der Drosselspule in einer Stromversorgung Auskunft gibt. Mit der Leistungsanalyse-Software kann eine solche B-H-Analyse an einem Oszilloskop schnell und ohne teure Spezialtools ausgeführt werden. Drosselspule und Transformator weisen beim Einschalten und im stationären Zustand des

Netzteils ein unterschiedliches Verhalten auf. Bisher mussten Entwickler zur Darstellung und Analyse der B-H-Eigenschaften die Signale erfassen und dann auf einem PC weiter analysieren. Mit der Oszilloskopsoftware ist die B-H-Analyse jetzt direkt am Oszilloskop möglich und liefert eine sofortige Darstellung des Drosselspulenverhaltens (Bild 8).

### Verlustleistung an magnetischen Komponenten

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Verlustleistung ist der Bereich des Magnetkerns. Im

Diese Analysefunktion für magnetische Komponenten misst auch automatisch den Leistungsverlust und den Wert der Drosselspule in einer echten Stromversorgungs-umgebung. Zur Ermittlung des Kernverlusts an der Drosselspule oder am Transformator misst man einfach den Leistungsverlust an beiden Komponenten. Die Differenz zwischen diesen Ergebnissen ist der Leistungsverlust am Kern. Im lastfreien Zustand entspricht der Leistungsverlust an der ersten Komponente außerdem dem Gesamtleistungsverlust an der zweiten Komponente, einschließlich Kernverlust. Diese Messungen können über den Bereich der Verlustleistung Aufschluss geben. (JJ)

Netzteils ein unterschiedliches Verhalten auf. Bisher mussten Entwickler zur Darstellung und Analyse der B-H-Eigenschaften die Signale erfassen und dann auf einem PC weiter analysieren. Mit der Oszilloskopsoftware ist die B-H-Analyse jetzt direkt am Oszilloskop möglich und liefert eine sofortige Darstellung des Drosselspulenverhaltens (Bild 8).

**550e/1206**

**infoDIRECT**

[www.elektronik-industrie.de](http://www.elektronik-industrie.de)

▶ [Link zu Tektronix](#)