

*Analyse kleiner Spannungen bei gleichzeitig hohen
Spannungskomponenten am Beispiel der Bestimmung
des $R_{DS(ON)}$ eines MOSFET in einem Schaltnetzteil*

Matthias Beer, Renate Mittermair, Dr. Markus Herdin

Geschäftsbereich Messtechnik
Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
München

Zusammenfassung — Die gleichzeitige Messung kleiner und großer Spannungen ist eine alltägliche Herausforderung beim Entwickeln und Testen von Elektronik. Typische Anwendungsfälle sind Schaltnetzteile (engl.: Switched-Mode Power Supplies, SMPS), bei denen die Spannung über den Schalttransistor während einer Schaltperiode gemessen werden muss. In diesem Fall kann der Spannungsunterschied zwischen dem ON- und OFF-Zustand des Transistors bis zu hundert Volt oder mehr betragen. Um unter diesen Bedingungen kleine Spannungsanteile mit der nötigen Genauigkeit zu messen, wäre ein Oszilloskop mit mehr als 8 Bit Vertikalauflösung erforderlich. Ebenso müssen bei der Signalaufnahme die Tastköpfe so kontaktiert werden, dass Störeinkopplungen vermieden werden.

Stichwörter — $R_{DS(ON)}$, MOSFET, SMPS, HD, High Definition, Oszilloskop, Schaltnetzteil

I. SCHALTNETZTEIL

Schaltnetzteile transferieren die elektrische Leistung von einer Quelle zu einer Senke und wandeln dabei die Spannungs- und Stromkennlinien. Schaltnetzteile beinhalten einen Schaltregler, typischerweise einen MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor = Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) oder einen IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor = Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode). Der Durchlasstransistor wandelt die Leistung effizient, da er kontinuierlich schaltet und nur kurzzeitig in Übergangsregionen mit hoher Verlustleistung verweilt; idealerweise liegt die Verlustleistung des Schaltnetzteils bei Null. Die Regelung der Schaltnetzteil-Ausgangsspannung erfolgt durch die Änderung des Tastverhältnisses des Schalttransistors. Die Schalter werden mit Halbleiterkomponenten wie FETs, IGBTs oder Dioden realisiert.

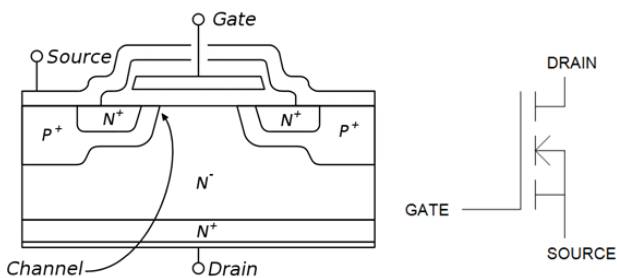


Abb. 1: Querschnitt eines MOSFET (einzelner VDMOS-Transistor)

Generell lassen sich Schaltnetzteile in galvanisch getrennte und galvanisch nicht getrennte Topologien einteilen. Beim letztgenannten Topologietyp werden typischerweise Abwärtswandler oder Aufwärtswandler eingesetzt [1], beim erstgenannten Sperrwandler (galvanisch getrennte Abwärts-Aufwärtswandler) oder Vollbrückenwandler [2]. Ein hocheffizienter Wandler für hohe Leistungsbereiche bis zu mehreren kW ist z.B. ein aktiver Vollbrückenwandler (Abb. 2). Hier werden oft

Leistungs-MOSFETs als Gleichrichter eingesetzt, da diese für hohe Leistungspegel ausgelegt sind und gleichzeitig eine hohe Schaltgeschwindigkeit und einen guten Wirkungsgrad bei niedrigen Spannungen aufweisen.

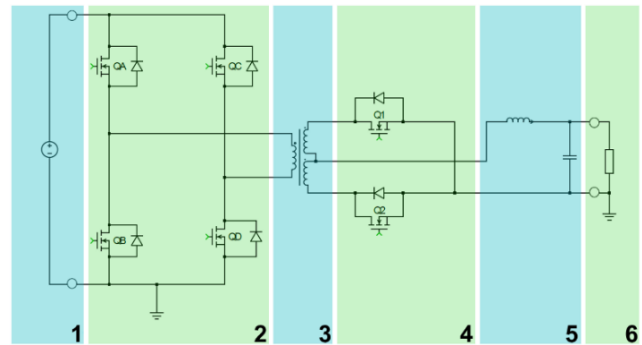


Abb. 2: Blockschaltbild eines aktiven Vollbrückenwandlers (1: Gleichstrom-Eingangsvorsorgung; 2: DC/AC-Wandler; 3: Transformator; 4: Aktiver Gleichrichter; 5: Filter; 6: Last)

Bei Schaltnetzteil-Anwendungen ist der Widerstand des Leistungshalbleiters ($R_{DS(ON)}$) ein Schlüsselparameter zur Bestimmung des Durchlassverlusts des üblicherweise eingesetzten Leistungs-MOSFET. Der Durchgangswiderstand zwischen dem Senken- und Quellen-Anschluss (Drain- und Source-Anschluss, Index DS) des Transistors im ON-Zustand ergibt sich als Summe der Widerstände der resistiven Elemente zwischen diesen Anschlüssen (Abb. 3).

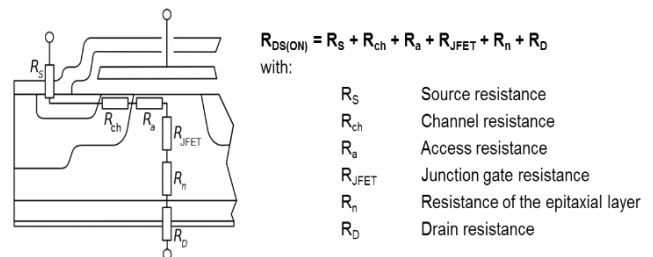


Abb. 3: $R_{DS(ON)}$ als Summe der Widerstände der resistiven Elemente zwischen Drain- und Source-Anschluss eines MOSFET im ON-Zustand

Für die Bestimmung von $R_{DS(ON)}$ ergeben sich spezielle Anforderungen, da im ON-Zustand kleine Spannungen zwischen Drain und Source gemessen werden müssen, typischerweise wenige Hundert mV, während im OFF-Zustand hohe Spannungen zwischen Drain und Source auftreten. Neben diesem großen Dynamikbereich müssen schnelle Anstiegs- und Abfallzeiten in der Größenordnung von Nanosekunden berücksichtigt werden. Diese Bedingungen führen zu speziellen Anforderungen an das Messgerät, typischerweise ein Oszilloskop.

II. GENAUE MESSUNG VON $R_{DS(ON)}$

Um den Durchgangswiderstand $R_{DS(ON)}$ eines Schaltnetzteil- MOSFET zu berechnen, müssen der Drain-Strom und die Drain-Source-Spannung des Gleichrichters

gemessen werden (Abb. 2, Abschnitt 4). Die Taktrate des Gleichrichters, üblicherweise im 100 kHz-Bereich, stellt keine besondere Anforderung an das Oszilloskop dar. Die gleichzeitige und präzise Messung kleiner Drain-Source-Spannungen – typischerweise wenige Hundert mV – und hoher Drain-Source-Spannungspegel im OFF-Zustand und schnelle Zustandswechsel erfordern bestimmte Eigenschaften des Messgerätes. Die Darstellung solcher Signale mit zugleich großen und kleinen Spannungsanteilen, erfordert einen hohen Dynamikbereich der mit einer A/D – Wandlerrauflösung von 8-Bit schwer zu erreichen ist. Beispielsweise zeigt Gleichung 1, dass die Auflösung eines 8-Bit A/D-Wandlers etwa 39 mV betragen würde, wenn ein 100 V-Signal gemessen wird.

$$\text{Vertikalauflösung eines A/D – Wandlers} = \frac{V_{CC}}{2^n - 1}$$

Gleichung 1: Berechnung der Vertikalauflösung eines n-Bit A/D-Wandlers mit Referenzspannung V_{CC}

Zusätzlich können unzureichende Tastkopfkompensation und falsche Kontaktierungstechniken zu signifikanten Signalverzerrungen und damit zu falschen Messergebnissen führen, selbst wenn das Oszilloskop den notwendigen Dynamikbereich bietet.

A. Analyse von kleinen Spannungen bei einem hohen Dynamikbereich.

Um die genaue Bestimmung der Drain-Source-Spannung zur Bestimmung des $R_{DS(ON)}$ zu ermöglichen wird die High-Definition Option bei den digitalen Oszilloskopen R&S®RTO und R&S®RTE eingesetzt. Im High-Definition-Mode wird das erfasste Signal einer digitalen Tiefpassfilterung unterzogen. Dies reduziert die Rauschleistung und verbessert das Signal-Rauschverhältnis innerhalb der Filterbandbreite. Mit dieser Methode lässt sich – abhängig von der gewählten Filterbandbreite – eine 256-fache Erhöhung der Auflösung im Vergleich zur üblichen 8-Bit-Auflösung erzielen. Diese Steigerung entspricht einer Vertikalauflösung von 16 Bit (Abb. 4).



Abb. 4: Option R&S®RTO-/R&S®RTE-K17 – High-Definition-Mode

Mit diesem Ansatz ist es möglich, kleinste Signaldetails wie die Drain-Source-Spannung in Schaltnetzteil-Anwendungen präzise darzustellen, die sonst vom Rauschen verdeckt würden. Abb. 5 und Abb. 6 zeigen eine solche Messung. In Abb. 5 ist der High-Definition-Mode inaktiv; somit ist das dargestellte Rauschen signifikant höher als in Abb. 6 mit aktiviertem High-Definition-Mode. Der Gewinn an Auflösung ist an der Messkurve und insbesondere am gezoomten Teil des Signals (Abb. 6) zu erkennen. Sowohl die Messkurve als auch der gezoomte Teil zeigen weniger Rauschen und mehr Signaldetails im

Vergleich zum dargestellten Ergebnis in Abb. 5, in der der High- Definition-Mode nicht aktiviert ist. Nur im HD Modus ist der typische Spannungsabfall im ON-Zustand des MOSFET sicht- und messbar.

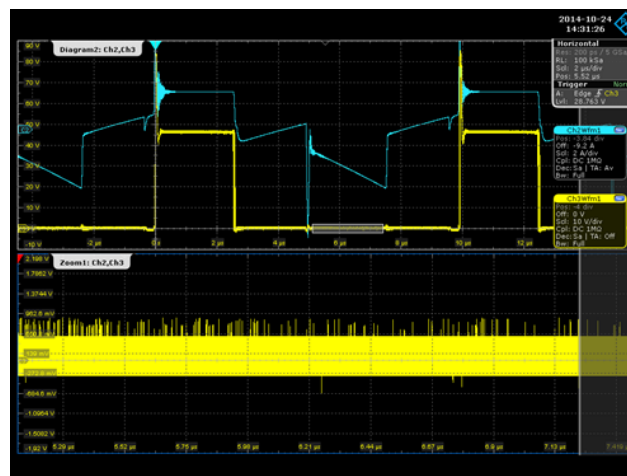


Abb. 5: Drain-Source-Spannungsmessung eines Schaltnetzteils ohne Aktivierung des High-Definition-Mode

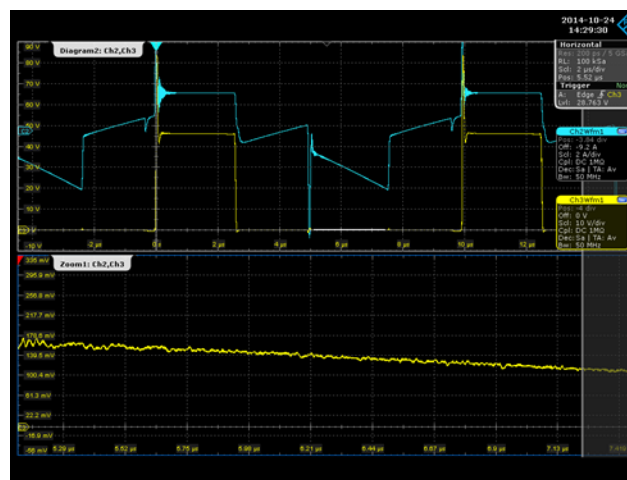


Abb. 6: Drain-Source-Spannungsmessung eines Schaltnetzteils mit aktiviertem High-Definition-Mode

B. Vermeidung von Offset-Problemen bei der Berechnung von $R_{DS(ON)}$

Die Messung von unterschiedlichen Spannungspegeln über einen hohen Dynamikbereich erfordert zusätzliche Maßnahmen, um ein exaktes Ergebnis zu erzielen. Zur Berechnung von $R_{DS(ON)}$ eines MOSFET reicht die Offset-Genauigkeit eines Oszilloskops nicht aus, um einfach nur durch Division der über den MOSFET gemessenen Drain-Source-Spannung durch den Drain-Strom zu einem genauen Ergebnis zu gelangen. Darüber hinaus werden nur die Wechselstromanteile berücksichtigt, wenn Rogowski-Tastköpfe zur Messung des Stroms durch den Drain-Anschluss des MOSFET verwendet werden. Die Strommessung am Oszilloskop weist aus diesen Gründen einen DC-Offset auf. Zur Lösung dieses Problems kann man sich die Tatsache zunutze machen, dass der Drain-Strom für ein bestimmtes Zeitintervall einen konstanten oder nahezu konstanten Abfall aufweist, während sich der MOSFET im ON-Zustand befindet. Somit kann hier zur

Berechnung von $R_{DS(ON)}$ eine differenzielle Methode angewendet werden wie in Abb. 7 gezeigt.

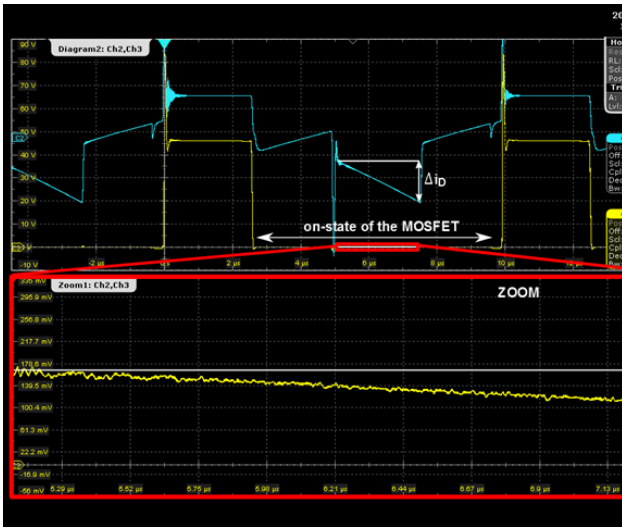


Abb. 7: Differenzielle Methode zur Berechnung von $R_{DS(ON)}$ bei Messungen über einen hohen Dynamikbereich

Die Methode besteht darin, den Abfall der Drain-Source-Spannung während eines bestimmten Zeitintervalls zu messen und daraus zunächst ΔU_{DS} abzuleiten. Danach muss, um ΔI_D zu erhalten, der Abfall des Drain-Stroms des MOSFET im gleichen Zeitintervall gemessen werden. $R_{DS(ON)}$ kann nun aus ΔU_{DS} und ΔI_D berechnet werden.

C. Richtige Kontaktierung und Tastkopfkompensation für exakte Messungen

Die richtige Kontaktierung ist Voraussetzung, um exakte Messergebnisse zu erzielen. Bei der Messung von Signalen mit hochfrequenten Anteilen ist sicherzustellen, dass die "Schleife", die von den Kontaktierungsanschlüssen (Signal-Pin und Masseanschluss) gebildet wird, so kurz wie möglich ist. Die gefederte Spitze des passiven Tastkopfs R&S®RT-ZP10 erlaubt zusammen mit den Massekontakt-Federn eine sichere Kontaktierung mit minimaler Rausch- und Störeinkopplung am gemessenen Signal (Abb. 8). Dies ermöglicht eine direkte Kontaktierung von Anschlüssen und Substrat des MOSFET.

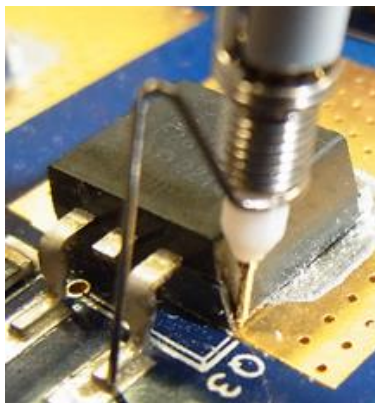


Abb. 8: Passiver Tastkopf R&S®RT-ZP10 mit Massekontakt-Feder zur Reduzierung von Rausch- und Störeinkopplung

Zusätzlich ist für hochauflösende Messungen eine präzise Tastkopfkompensation sehr wichtig. Ein unzureichend kompensierter Tastkopf führt zu Messfehlern und damit zu ungenauen Messwerten, was auch differenzielle Messungen beeinflussen kann. Bei Messungen, bei denen keiner der MOSFET-Anschlüsse Massepotential hat, kann ein aktiver, differenzieller Tastkopf wie der R&S®RT-ZD10 eingesetzt werden.

III. Fazit

Zur Analyse von Signalen, die sowohl große als auch kleine Spannungsanteile aufweisen, müssen spezielle Betrachtungen angestellt werden. Das hier beschriebene Beispiel – die Messung von $R_{DS(ON)}$ eines Schaltnetzteils – ist eine typische Anwendung und zeigt, dass spezielle Testfunktionalität erforderlich ist, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Moderne Oszilloskope wie das R&S®RTO und R&S®RTE bieten die entsprechenden Funktionen und erlauben es dem Anwender, seine Messaufgabe schnell und präzise zu lösen. Spezielle Eigenschaften wie der High-Definition-Mode (Option R&S®RTO-/R&S®RTE-K17 für die digitalen Oszilloskope R&S®RTO/R&S®RTE) machen die Signalanalyse noch genauer und einfacher, da das Rauschen der dargestellten Messkurven reduziert wird und kleinste Signaldetails angezeigt werden.

IV. LITERATUR

- [1] Barry Rowland, "Initial Evaluation of a DC/DC Switch Mode Power Supply", Rohde & Schwarz Application Note 1TD04, 2013
- [2] Christophe Basso, "Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs", McGraw Hill Professional, 2008
- [3] Bo Yang, "Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System", PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2003
- [4] Davide Giacomini, "A novel high efficient approach to input bridges", PCIM Europe, May 2008
- [5] Ulrich Tietze, Christoph Schenk, "Electronic Circuits", Springer, 2008