

Optisch isolierte Sonden für moderne Leistungselektronik



Anwendungshinweis

1. Einleitung

Breitbandige Halbleitertechnologien wie SiC und GaN verändern die moderne Leistungselektronik rasant. Schnellere Schaltübergänge, höhere Busspannungen und eine erhöhte Leistungsdichte ermöglichen effizientere und kompaktere Systeme. Allerdings bringen genau diese Eigenschaften erhebliche Herausforderungen für die Messtechnik mit sich.

Hohe dv/dt -Übergänge, die oft mehrere zehn oder hundert $kV/\mu s$ überschreiten, erzeugen starke Gleichtakt-Transienten und Verschiebungsströme. Diese Effekte belasten das Messsystem direkt und können die beobachteten Wellenformen verzerren, insbesondere bei der Messung von High-Side-Knoten oder schnellen Gate-Übergängen.

Bei der Entwicklung moderner Wandler ist die genaue Messung der Gate-Source-Spannung (VGS) von entscheidender Bedeutung. Eine Fehlinterpretation von Überschwingungen, Schwingungen oder Schaltgeschwindigkeiten kann zu folgenden Problemen führen:

- Falsche Charakterisierung des Bauteils
- Suboptimale Auswahl des Gate-Widerstands
- Unterschätzung der EMI-Leistung
- Reduzierte Langzeitzuverlässigkeit

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, spielt die Architektur der Messsonde eine entscheidende Rolle. In diesem Anwendungshinweis wird eine herkömmliche Hochspannungs-Differenzsonde mit einer optisch isolierten Sonde in einer kontrollierten Schaltungsumgebung verglichen, wobei hervorgehoben wird, warum die optische Isolierung in modernen Hochspannungsdesigns unverzichtbar ist.

2. Theoretischer Hintergrund: CMRR und CMTI

2.1 Gleichtaktunterdrückungsverhältnis (CMRR)

CMRR beschreibt die Fähigkeit einer Sonde, Gleichtaktspannungen zu unterdrücken und gleichzeitig Differenzspannungen genau zu messen.

$$CMRR = 20 \log \left(\frac{A_d}{A_{cm}} \right)$$

In praktischen Systemen:

- CMRR nimmt mit der Frequenz ab
- Schnelle Schaltflanken enthalten hochfrequente Komponenten
- Kleine Eingangsfehlanspassungen verursachen Differenzfehler

Bei hohem dv/dt führt eine verschlechterte CMRR zu künstlichem Klingeln, Überschwingen und Wellenformverzerrungen.

2.2 Gleichtakt-Transientenimmunität (CMTI)

CMTI definiert die Toleranz der Sonde gegenüber schnellen Spannungsübergängen.

$$V_{error} \propto \frac{dv}{dt} \times C_{parasitic}$$

Bei Differenzsonden ermöglichen parasitäre Kapazitäten, dass Verschiebungsstrom in den Messpfad gekoppelt wird. Durch optische Isolierung wird der leitende Erdungspfad entfernt, wodurch die Störfestigkeit gegenüber Gleichtakt-Transienten erheblich verbessert wird.

3. Testkonfiguration

3.1 Messgeräte

Die Bewertung wurde durchgeführt mit:

- Oszilloskop Rigol DHO5108
- Optisch isolierte Sonde Rigol PIA1100
- Differential-Sonde Rigol RP1100D
- Hochspannungs-MOSFET-Schaltplatine

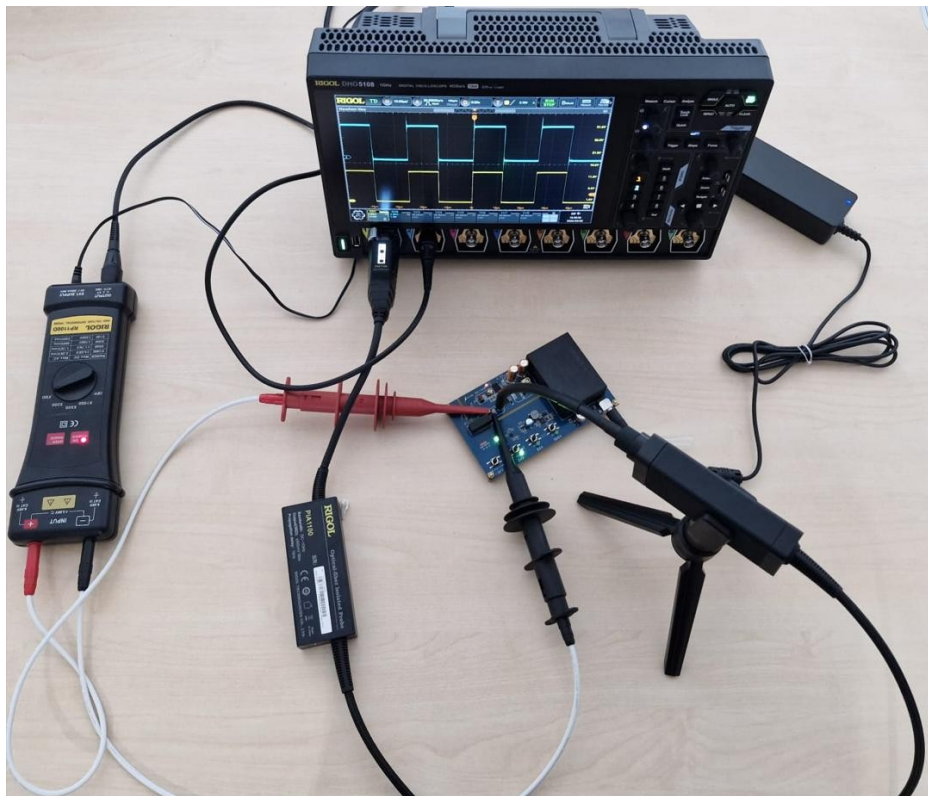


Abbildung 1. Komplette Laborausstattung mit Oszilloskop DHO5108, optisch isolierter Sonde PIA1100, Differenzialsonde RP1100D und Hochspannungs-MOSFET-Testplatine.

3.2 Beschreibung der Testplatine

Die Hochspannungsplatine besteht aus MOSFET-Transistoren, die in einer Schalt-Topologie konfiguriert sind. Es wurden zwei Messknoten bewertet:

- L-GS (Low-Side-Gate-to-Source-Spannung)
- H-GS (High-Side-Gate-Source-Spannung)

Wählbare Busspannungen:

- 20 V
- 80 V
- 300 V



Abbildung 2. Hochspannungs-MOSFET-Schaltplatine mit wählbaren Busspannungspegeln.

3.3 Details zum Anschluss der Prüfspitzen

Beide Sonden wurden nacheinander an identische Testpunkte angeschlossen. Die Anschlussgeometrie und Erdung wurden einheitlich gehalten, um einen fairen Vergleich zu gewährleisten.

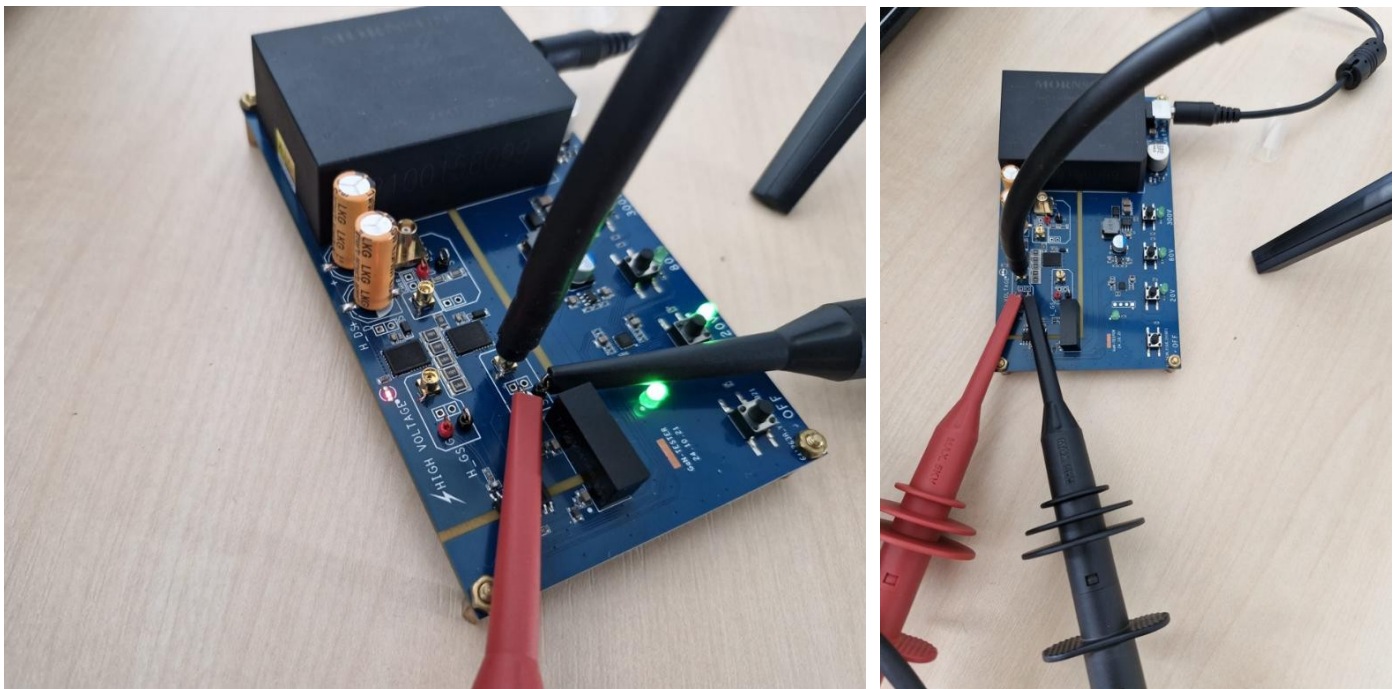


Abbildung 3: Nahaufnahme der Sondenanschlüsse an den Gate-Source-Messknoten.

4. Low-Side-Gate-Messungen (L-GS)

4.1 L-GS bei 20 V

Selbst bei einer relativ niedrigen Busspannung von 20 V ist bereits ein messbarer Unterschied zwischen den Sondenarchitekturen zu beobachten.

Obwohl der DC-Bus-Pegel moderat ist, bleiben die Gate-Übergänge schnell. Diese schnellen Flanken erzeugen eine ausreichende dv/dt -Belastung, um die Grenzen der Hochfrequenz-Gleichtaktunterdrückung aufzudecken.

Bevor die Kantendetails analysiert werden, ist es aufschlussreich, das gesamte Mehrzyklus-Schaltverhalten zu untersuchen.



Abbildung 4: Vollständige Low-Side-Gate-Wellenform bei einer Busspannung von 20 V. Die Differenzsonde weist im Vergleich zur optisch isolierten Sonde ein erhöhtes Grundrauschen auf.

Über mehrere Schaltperioden hinweg behält die optisch isolierte Sonde eine stabile Grundlinie und eine konstante Amplitude bei. Die Wellenform bleibt sauber, und das Klingelverhalten entspricht weitgehend den erwarteten parasitären Effekten der Schaltung.

Im Gegensatz dazu weist die Differenzsonde zusätzliches Hochfrequenzrauschen auf, das sowohl dem hohen als auch dem niedrigen Zustand überlagert ist. Dieses Rauschen ist nicht Teil der tatsächlichen Schaltungsantwort, sondern resultiert aus einer begrenzten Hochfrequenz-CMRR und parasitären Kopplungen innerhalb der Sondenstruktur.

Selbst bei 20 V ist dv/dt und nicht die Busgröße der dominierende Belastungsmechanismus, der die Messintegrität beeinflusst.

4.2 L-GS Vergrößerte Übergänge – Spannungsanstieg

4.2.1 Zoom – 20 V



Abbildung 5: Vergrößerter L-GS-Übergang bei einer Busspannung von 20 V.

Bei 20 V weist die Differenzsonde bereits erhöhte hochfrequente Störkomponenten an der Schaltflanke auf. Die optisch isolierte Sonde sorgt für eine verbesserte Flankenschärfe und geringere Überlagerungsstörungen.

Dies zeigt, dass nicht nur die dv/dt -Busgröße die Messbelastung bestimmt.

4.2.2 Zoom – 80 V



Abbildung 6: Vergrößerter L-GS-Übergang bei einer Busspannung von 80 V.

Bei 80 V wird der Effekt des steigenden dv/dt deutlicher. Die Differenzsonde zeigt ein verstärktes Schwingungsverhalten und eine verstärkte Klingelamplitude. Die optische Sonde behält eine besser kontrollierte Wellenformdefinition bei und reduziert den scheinbaren Rauschbeitrag.

Der Gleichtakt-Umwandlungsfehler nimmt mit der Amplitude des Spannungsübergangs zu.

4.2.3 Zoom – 300 V



Abbildung 7. Vergrößerter L-GS-Übergang bei 300 V Busspannung unter hoher dv/dt -Belastung.

Bei 300 V erreicht die Messumgebung eine hohe Gleichtakt-Transientenbelastung. Die Differenzsonde weist eine erhebliche Ringungsverstärkung und sichtbare Verzerrungen auf.

Die optisch isolierte Sonde behält eine hervorragende Flankenauflösung bei und reduziert überlagerte Störungen, was die verbesserte CMTI-Leistung deutlich zeigt.

Bei diesem Spannungsniveau wird die Sondenarchitektur zu einem dominierenden Faktor für die Genauigkeit der Wellenform.

5. High-Side-Gate-Messungen (H-GS)

Die High-Side-Gate-Messung stellt ein anspruchsvolleres Szenario dar als die Low-Side-Messung.

Obwohl die Gleichstrom-Bussspannung 20 V beträgt, bewegt sich der Quellknoten des High-Side-MOSFET dynamisch mit der Schaltwellenform. Dies führt zu einer erheblichen Gleichtaktbewegung relativ zur Oszilloskop-Masse.

Da das Referenzpotential potentialfrei ist, spielt die Sondenarchitektur eine entscheidende Rolle für die Aufrechterhaltung der Wellenformintegrität.

5.1 H-GS – Vollständiger Signalüberblick

Vor der Analyse der Flankenübergänge wird die vollständige Mehrzyklus-Wellenform ausgewertet.



Abbildung 8: Vollständige High-Side-Gate-Wellenform bei 20 V Busspannung.

Über mehrere Schaltzyklen hinweg gewährleistet die optisch isolierte Sonde:

- Stabile hohe Amplitude
- Saubere Basislinie im niedrigen Zustand
- Konsistentes Verhalten von Zyklus

zu Zyklus Die Differenzsonde zeigt jedoch:

- Erhöhte Hochfrequenzstörungen sowohl im hohen als auch im niedrigen Zustand
- Erhöhtes Klingeln während Übergängen
- Leichte Instabilität der Basislinie zwischen den Schaltperioden

Dies deutet darauf hin, dass selbst bei 20 V die Messbedingungen mit schwebendem Knoten die Gleichtaktkopplungseffekte innerhalb der Differenzmesskopfstruktur verstärken.

5.2 H-GS – Steigende Flanke (20 V)

Um das Übergangsverhalten besser zu verstehen, wird die steigende Flanke im Detail untersucht.



Abbildung 9: Vergrößerter Anstieg der High-Side-Gate-Übergangsflanke bei 20 V.

Während des Anstiegsübergangs:

- Die Differenzsonde zeigt unmittelbar nach der Flanke ein verstärktes Klingeln.
- Die hochfrequenten Schwingungen sind sichtbar stärker und halten länger an.
- Zusätzliches überlagertes Rauschen erscheint im sich einstellenden Teil der Wellenform.

Die optisch isolierte Sonde bietet:

- Sauberere Übergangsform
- Reduzierte Hochfrequenzverstärkung
- Besser kontrolliertes Einschwingverhalten

Dieser Unterschied steht im Einklang mit einer verbesserten CMTI-Leistung und einer reduzierten parasitären Gleichtaktkopplung.

5.3 H-GS – Fallender Übergang

Die fallende Flanke unterstreicht die Unterschiede in der Sondenarchitektur zusätzlich.



Abbildung 10: Fallender Übergang des High-Side-Gates bei 20 V.

Während des fallenden Übergangs:

- Die Differentialsonde zeigt unmittelbar nach der Flanke ein ausgeprägtes Schwingungsverhalten.
- Die Schwingungsamplitude ist sichtbar höher.
- Es treten zusätzliche transiente Spitzen auf, die nicht mit der erwarteten Gate-Ansteuerungsreaktion übereinstimmen.

Die optisch isolierte Sonde bietet:

- Verbesserte Kantenschärfe
- Reduzierte Überschwungung
- Schnellere Stabilisierung nach dem Übergang

Dies bestätigt, dass schwebende High-Side-Knoten die Gleichtaktbelastung verstärken und die optische Isolierung die Messgenauigkeit unter diesen Bedingungen erheblich verbessert.

6. Fazit

Bei dieser Bewertung wurde eine herkömmliche Differenzsonde mit einer optisch isolierten Sonde bei Low-Side- und High-Side-MOSFET-Gate-Messungen unter steigenden Busspannungsbedingungen verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sondenbedingte Messunterschiede bereits bei 20 V auftreten und bei 80 V und 300 V zunehmend deutlicher werden. Mit steigendem dv/dt weist die Differenzsonde ein erhöhtes Hochfrequenzrauschen, verstärktes Klingeln und größere Basislinienstörungen auf. Diese Effekte werden durch eine begrenzte Hochfrequenz-CMRR und Empfindlichkeit gegenüber Gleichtakt-Transienten verursacht.

Im Gegensatz dazu bietet die optisch isolierte Sonde durchweg eine verbesserte Wellenformklarheit, reduziertes überlagertes Rauschen und ein stabileres Mehrzyklusverhalten. Messungen auf der High-Side, bei denen sich der Referenzknoten dynamisch bewegt, unterstreichen zusätzlich den Vorteil der galvanischen Isolierung bei der Minimierung von Gleichtaktkopplungseffekten.

Diese Ergebnisse bestätigen, dass in modernen schnell schaltenden Leistungselektroniksystemen die Messgenauigkeit stark von der Sondenarchitektur beeinflusst wird. Optisch isolierte Sonden bieten eine verbesserte CMTI-Leistung und eine verbesserte Signaltreue, was eine zuverlässigere Analyse des Schaltverhaltens in Umgebungen mit hohem dv/dt ermöglicht.

In der Hochgeschwindigkeits-Leistungselektronik wird die Messintegrität nicht nur vom Oszilloskop bestimmt, sondern auch von der Sondenarchitektur, die das Gerät mit dem Schaltkreis verbindet.



Weiterführende Literatur

Die folgenden Dokumente und Ressourcen enthalten zusätzliche Informationen zu den in diesem Anwendungshinweis behandelten Geräten und Messtechniken:

- Rigol Technologies, *Datenblatt zum hochauflösenden Oszilloskop der Serie DHO5000.*
- Rigol Technologies, *Datenblatt zum optisch isolierten Messkopf PIA1100.*
- Rigol Technologies, *Datenblatt zum Hochspannungs-Differenzmesskopf RP1100D.*
- Texas Instruments, *Anwendungsbericht zum Verständnis des Gleichtaktunterdrückungsverhältnisses (CMRR).*
- Analog Devices, *Gleichtakt-Transientenimmunität in Hochgeschwindigkeitssystemen*, Technischer Artikel.
- IEEE, *Messverfahren für Leistungselektroniksysteme mit hohem dv/dt* , Konferenzbericht.

Erstellt von Stas Anbinder, Senior Application Engineer, Rigol Technologies.



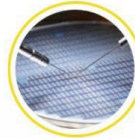
Anwendungshinweis: Optisch isolierte Sonden für moderne Leistungselektronik

Boost Smart World and Technology Innovation

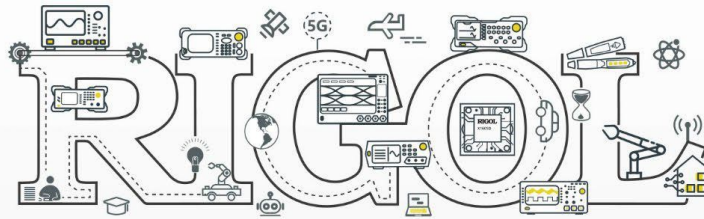
Industrial Intelligent Manufacturing



Semiconductors



Education & Research



Communication

System Integration



New Energy



- Cellular-5G/WIFI
- UWB/RFID/ ZIGBEE
- Digital Bus/Ethernet
- Optical Communication

- Digital/Analog/RF Chip
- Memory and MCU Chip
- Third-Generation Semiconductor
- Solar Photovoltaic Cells

- New Energy Automobile
- PV/Inverter
- Power Test
- Automotive Electronics

Provide Testing and Measuring Products and Solutions for Industry Customers

HEADQUARTER

RIGOL TECHNOLOGIES CO., LTD.
No.8 Keling Road, New District,
Suzhou, JiangSu, P.R.China
Tel: +86-400620002
Email: info-cn@rigol.com

JAPAN

RIGOL JAPAN CO., LTD.
5F, 3-45-6, Minamiotsuka, Toshima-Ku,
Tokyo, 170-0005, Japan
Tel: +81-3-6262-8932
Fax: +81-3-6262-8933
Email: info.jp@rigol.com

EUROPE

RIGOL TECHNOLOGIES EU GmbH
Friedrichshafener Str. 5
82205 Gilching
Germany
Tel: +49(0)8105-27292-21
Email: info-europe@rigol.com

KOREA

RIGOL KOREA CO., LTD.
5F, 222, Gonghang-daero,
Gangseo-gu, Seoul, Republic of Korea
Tel: +82-2-6953-4466
Fax: +82-2-6953-4422
Email: info.kr@rigol.com

NORTH AMERICA

RIGOL TECHNOLOGIES, USA INC.
10220 SW Nimbus Ave.
Suite K-7
Portland, OR 97223
Tel: +1-877-4-RIGOL-1
Email: sales@rigol.com

For Assistance in Other Countries

Email: info.int@rigol.com

RIGOL® is the trademark of **RIGOL TECHNOLOGIES CO., LTD.** Product information in this document is subject to update without notice. For the latest information about **RIGOL's** products, applications and services, please contact local **RIGOL** channel partners or access **RIGOL** official website: www.rigol.com