

Auf dem Weg zum idealen Stromsensor

Dr. Ullrich Hetzler, Isabellenhütte Heusler

Um weiterhin bestehen zu können, musste der Shunt in den vergangenen Jahrzehnten eine enorme Entwicklung durchschreiten. Heute ist er besser denn je und ein gefragtes Bauelement in modernen Anwendungen wie z. B. der High-Side-Strommessung in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Aber Shunt ist nicht gleich Shunt. Der Beitrag erläutert, worauf es bei der Wahl eines Shunts ankommt.

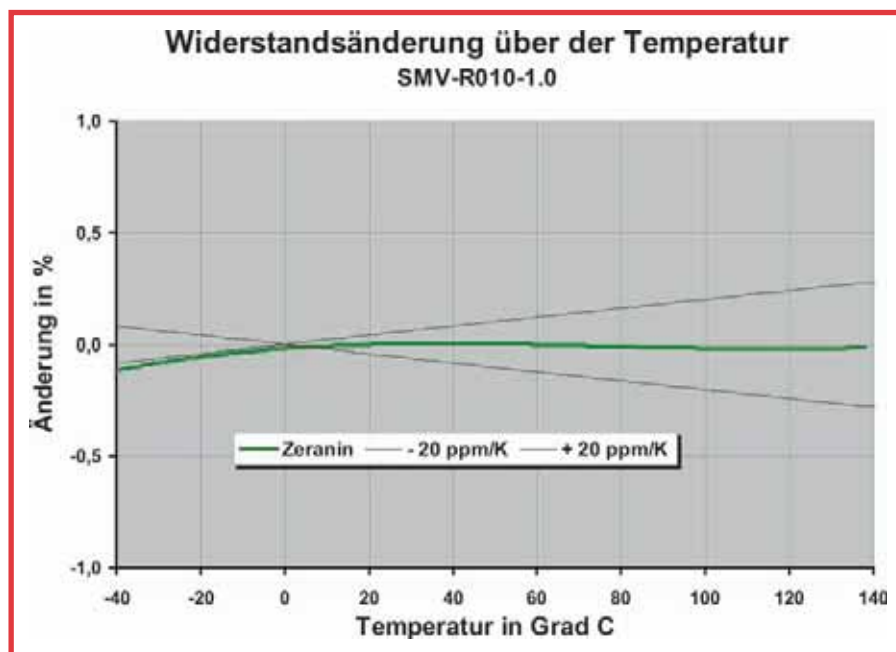


Bild 1. Niedriger TK durch Manganin, Zeranolin und Isohm

Zur Stromerfassung steht eine Vielzahl von Sensoren zur Verfügung, die verschiedene physikalische Prinzipien für die Messung nutzen. Großtechnische Bedeutung haben Strommesswiderstände und die große Gruppe von Sensoren, die das vom Mess-Strom erzeugte Magnetfeld nutzen. Hierzu zählen Stromwandler, Hallsensoren und GMR-Sensoren. Für Nischenanwendungen kommen auch optische Verfahren zum Einsatz.

Für den Designingenieur ist es oftmals schwer, den für seine Anwendung optimalen Stromsensor zu finden. Häufig sind in den Datenblättern Leistungsdaten wie Linearität, Absolutgenauigkeit, Temperaturabhängigkeit und Lastverhalten nicht vollständig bzw. für verschiedene Sensoren nicht vergleichbar angegeben. Er muss Eckdaten seiner Applikation ermitteln und den geeigneten Sensor für den Strom-, Frequenz- und Temperatur-

bereich suchen. Weitere zu berücksichtigende Daten sind Auflösung, Störfestigkeit, Offset, Langzeitverhalten, Isolation, Bauvolumen, Stromverbrauch und Montageart.

Trotz aller gegenteiliger Behauptungen ist bei Niederspannungsanwendungen (z. B. im Automotive-Bereich) oder masseseitigen Messungen (z. B. Haushaltsgeräte) der Shunt in den meisten Fällen die bessere Lösung. Vor allem die Präzisionsshunts in SMD-Ausführung sind mit den bekannten, bedrahteten Widerständen nicht mehr vergleichbar und zeichnen sich durch hohe Genauigkeit, niedrigen TK, eine gute Langzeitstabilität und eine hohe Belastbarkeit aus. Darüber hinaus sind sie automatisch bestückbar, klein und vergleichsweise preiswert.

Die Erwartungen des Kunden kann man allgemein wie folgt beschreiben: Der Widerstandswert soll weitgehend unabhängig sein

von allen möglichen physikalischen Parametern wie Temperatur, Zeit, Leistung, Strom, Frequenz, Magnetfeld etc. Für den nach dem Ohmschen Gesetz am Widerstand entstehenden Spannungsabfall gilt:

$$U = R \cdot I + U_{th} + U_{offset} + U_{ind} + U_v + \dots$$

Die Zusatzanteile stellen Fehlerspannungen dar, die als stromunabhängiger Offset vor allem bei niederohmigen Widerständen und den damit verbundenen kleinen Messspannungen erhebliche Messfehler verursachen können. Die Verwendung eines für Cu thermoelektrisch nicht angepassten Materials (z. B. das immer noch benutzte Konstantan, CuNi44), erzeugt bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontakten eine Thermospannung U_{th} in der Größenordnung von 0,1 bis 1 mV. Vielen Entwicklern ist die Tatsache nicht bekannt, dass unter DC-Strom der in dieser Materialkombination ebenfalls wirkende Peltiereffekt die Temperaturdifferenz und damit die Thermospannung erst aufbaut. Das heißt der Fehler ist unvermeidbar. Um den Abstand zu den Fehlerspannungen zu vergrößern, hat man in der Vergangenheit möglichst hohe Widerstandswerte eingesetzt und dabei eine hohe Verlustleistung mit allen damit verbundenen Nachteilen in Kauf genommen.

Die extremen Fortschritte in der Mikroelektronik in den letzten Jahrzehnten haben sehr leistungsfähige, kompakte und preiswerte Operations- bzw. Messverstärker und Messwandler hervorgebracht, die sich durch niedrige Offsetspannung, einen niedrigen TK, niedriges Rauschen und eine sehr geringe Verlustleistung auszeichnen, sodass auch kleine Spannungswerte mit hoher Genauigkeit und geringem Rauschen gemessen werden können.

Induzierte Störspannungen können durch eine niedrige Eigeninduktivität der Widerstände (bis 0,2 nH) und kurze, induktions-

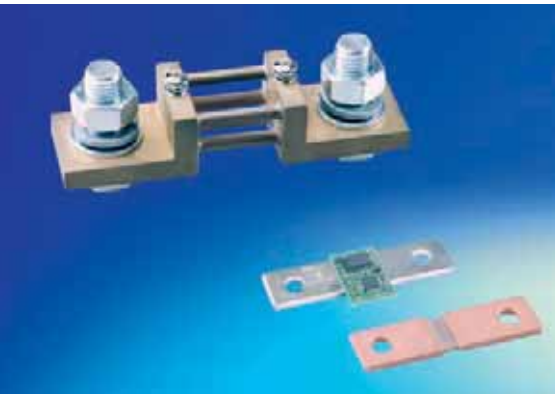


Bild 2. Der frühere DIN-Shunt im Vergleich zum modernen Messmodul mit ISA-ASIC und einem Isa-Weld-Shunt

arme Verbindungen zwischen Widerstand und Mess-System minimiert werden.

Weitere Fehlerspannungen sind z. B. durch den Versorgungsstrom auf der Leiterplatte verursachte Spannungen, die versehentlich in den Messkreis mit einbezogen werden. Durch ein sorgfältiges Design können diese Fehler aber weitgehend vermieden werden.

Da herkömmliche Widerstände mit all diesen Unzulänglichkeiten behaftet waren, hat es sich bei Designern eingebürgert, überdimensionierte Widerstände zu verwenden. Im Zuge der Miniaturisierung und der Umstellung auf SMD-Technik wurden in der Folge neue Bauteile mit deutlich verbesserten Eigenschaften gefordert.

Als beste Lösung für Strommesswiderstände mit Werten kleiner als 10 Ohm hat sich die ISA-Plan-Folientechnik oder bei niedrigen Werten unterhalb von 10 mOhm die ISA-Weld-Technik der Isabellenhütte erwiesen.

Die verwendeten Präzisionswiderstandslegierungen Manganin, Zeranin und Isohm sind Voraussetzungen für den niedrigen TK (**Bild 1**), die hohe zeitliche Stabilität und die verschwindend kleine Thermospannung der Widerstände.

Bei der Isa-Plan-Technik wird eine gewalzte, speziell stabilisierte Widerstandsfolie isolierend auf einem Cu- oder Al-Substrat verklebt, ätztechnisch strukturiert und zum SMD-Widerstand weiterverarbeitet. Das gut wärmeleitende Substrat sorgt für einen äußerst niedrigen inneren Wärmewiderstand, sodass die Shunts ohne Verlust an Stabilität und Genauigkeit auch noch bei hoher Temperatur mit der vollen Belastung betrieben werden können. Ein weiterer Vorteil des Metallsubstrats im Gegensatz zur üblicherweise eingesetzten Keramik ist ein der Leiterplatte deutlich besser angepasster Ausdehnungskoeffizient, was bei der Umstellung auf bleifreies Löten die Belastung der Lötstelle beim Temperaturwechsel sehr niedrig hält und damit eine hohe Lebensdauer garantiert.

Die Isa-Weld-Technik nutzt mit einem Elektronenstrahl verschweißte Bänder (Cu-Manganin-Cu) zur stanztchnischen Herstellung von niederohmigen, preiswerten Widerständen für Hochstromanwendungen als SMD-Ausführung oder aber zur Stromschienenmontage für Ströme bis weit über 1000 A (2 μ Ohm bis 3 mOhm).

Beide Fertigungstechnologien liefern hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften weitgehend optimierte Präzisions-Shunts, die dem idealen Stromsensor sehr nahe kommen. Sie machen es möglich, zusammen mit moderner Elektronik sehr kompakte Mess-

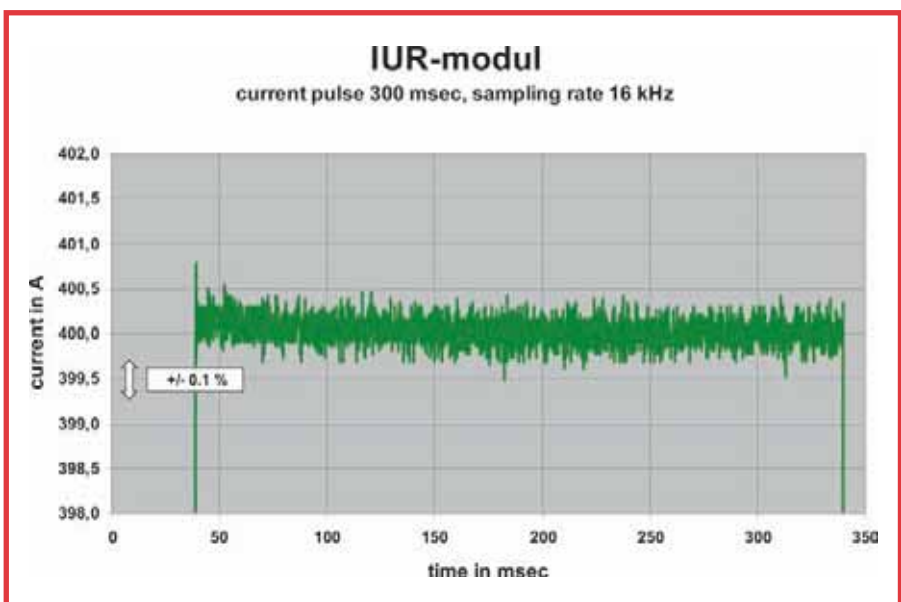


Bild 3. Pulsstrommessung mit dem ISA-ASIC

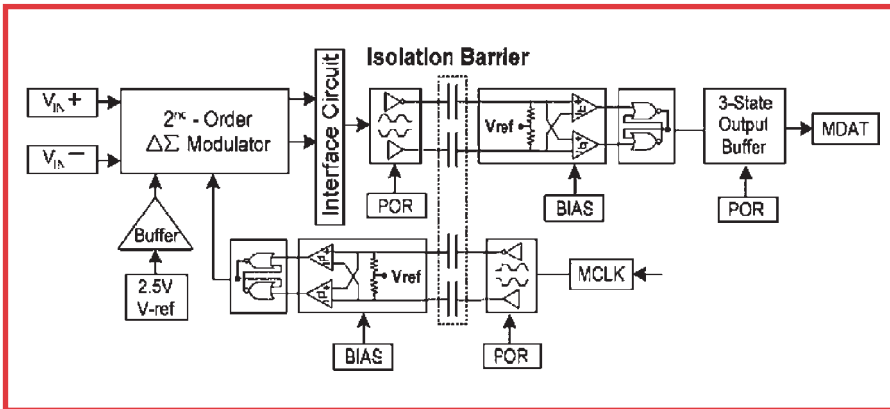


Bild 4. Shunt ersetzt Wandler in Hochleistungsmotorsteuerung

module mit einem bisher unerreichten Preis-Leistungsverhältnis für die Stromerfassung und Regelung zu entwickeln.

Shunts werden durch neuartige Halbleitergenerationen, z. B. hochauflösende, offsetfreie Messwandler für kleine Eingangsspannungen im $\mu\text{V}/\text{mV}$ -Bereich, Wandler mit integriertem μC und hochdynamische Isolationswandler zusätzliche Anwendungen finden – und zwar in Bereichen, die in der Vergangenheit traditionell den magnetischen Sensoren vorbehalten werden. Beispielhaft sollen im Folgenden einige Anwendungen etwas näher ausgeführt werden.

Hochstrommessung mit Shunt und ISA-ASIC

Der Bereich der Hochstrommessung war in der Vergangenheit dem Stromwandler oder allenfalls dem DIN-Shunt (DIN 43 7039) zusammen mit einer aufwändigen Messelektronik vorbehalten. Mit dem ISA-ASIC oder ähnlichen offsetfreien Messwandlern für kleine Spannungen lassen sich kompakte, preisgünstige und sehr viel genauere Module entwickeln, wie das in **Bild 2** dargestellte Messmodul für die hochpräzise und schnelle DC- und AC-Strommessung bis 400 A (kurzzeitig bis 1.500 A) zeigt.

Gegenüber herkömmlichen Hochstrom DIN-Shunts mit einem Spannungsabfall von 60 bis 300 mV bei Nennstrom erreichen aktuelle ISA-Weld-Shunt-basierte Systeme bei Spannungen von 10 mV und darunter eine deutlich höhere Genauigkeit bei kleinerem Bauvolumen, niedrigeren Kosten und einer um den Faktor 6 bis 10 niedrigeren Verlustleistung.

Die Platine mit der Auswerteschaltung (ISA-ASIC+ μC) ist direkt auf dem 100- μOhm -Isa-Weld-Shunt verlötet, womit eine extrem kurze Anbindung der Mess-Spannung an die Messwerterfassung und damit eine sehr hohe Störsicherheit und eine schnelle Ansprechgeschwindigkeit erreicht werden. Das ISA-ASIC stellt ein hochgenaues, absolut offsetfreies 16-Bit-Messwerterfassungssystem dar, das mit seinen vier Eingangskanälen und den Sonderfunktionen ideal für die Erfassung sehr niedriger Spannungen geeignet ist. Die Messwerte für Strom- und Spannung werden über eine RS232- oder RS485-Schnittstelle zur externen Weiterverarbeitung ausgegeben.

Bild 3 zeigt eine Pulsstrommessung von 400 A/300 ms, die mit einer Samplingrate von 16 kHz aufgenommen wurde. Man erkennt, dass der Messwert bereits nach einem Messzyklus ($<62 \mu\text{s}$) voll eingeschwungen ist. Floating-Messungen bei extremen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten von mehr als 7 kV/ms haben keinerlei Ausreißer oder Störungen gezeigt. Die vollständig kalibriert gelieferten Geräte haben eine sehr hohe Absolutgenauigkeit von (0,05 % vom Messwert $\pm 25 \text{ mA}$) und einen TK von 50 ppm/K.

High-Side-Strommessung

In batteriebetriebenen Geräten und der Automotive-Industrie muss in vielen Fällen der Strom auf der Spannungsversorgungsseite (High-Side) erfasst werden. Hierfür stellen verschiedene Halbleiterhersteller preiswerte, qualitativ hochwertige ICs mit niedrigen Offset-Werten und variabler Verstärkung (als Differenzverstärker oder Stromspiegel) zur Verfügung, die das über dem SMD-Shunt

auf der Versorgungsseite entstehende Signal verstärkt auf die Masseseite für die Weiterverarbeitung über einen μC übertragen. Damit können auch sehr niederohmige Widerstände für Ströme bis mehrere 100 A zum Einsatz kommen.

Isolierte Hochstrommessung für die Antriebstechnik

Verschiedene Halbleiterhersteller haben in jüngster Zeit neue Isolierwandler vorgestellt, die zusammen mit einem Shunt eine dynamische und isolierte Strommessung bis in den Bereich von 500 A ermöglichen. Die zugrunde liegende Idee ist es, einen 1-Bit-Sigma-Delta-Modulator auf der High-Side mit einem über eine Isolationsstrecke übertragenen Takt von 10 bis 20 MHz zu betreiben und das Ergebnis als Bit-Strom auf die Masseseite zu übertragen. Eine geeignete digitale Filterung des Signals ermöglicht eine äußerst flexible, hochdynamische und genaue Motorstrommessung und Regelung inklusive einer schnellen Überstromerkennung im μs -Bereich. Die Schaltungen verkraften die schnellen Spannungsänderungen moderner getakteter Motor-Ansteuerungen bis zu 15 kV/ μs problemlos und liefern einen 12 bis 14 Bit Messwert mit Samplingraten bis 100 kHz. Noch interessanter wird dieses Verfahren mit den neuesten Controllern, die die programmierbare Filterung bereits beinhalten. Zusammen mit der kompakten Bauform und der geringen Verlust- bzw. Messleistung ermöglicht dieser neue Ansatz ein bislang unerreichtes Preis-Leistungsverhältnis (**Bild 4**).

Damit kann und wird der Shunt langfristig eine traditionell dem Stromwandler vorbehaltene Domäne erobern und diesen vor allem in Hochleistungs-Motorsteuerungen wie Werkzeugmaschinen, Hybrid- und Elektrofahrzeugen verdrängen. (jo)

- **Isabellenhütte Heusler**
- Kennziffer: 212
- www.el-info.de ➔ Webcode: 10212

Zum Autor

Dr. Ullrich Hetzler
ist Leiter Forschung & Entwicklung bei Isabellenhütte Heusler.

