

Sonderdruck aus

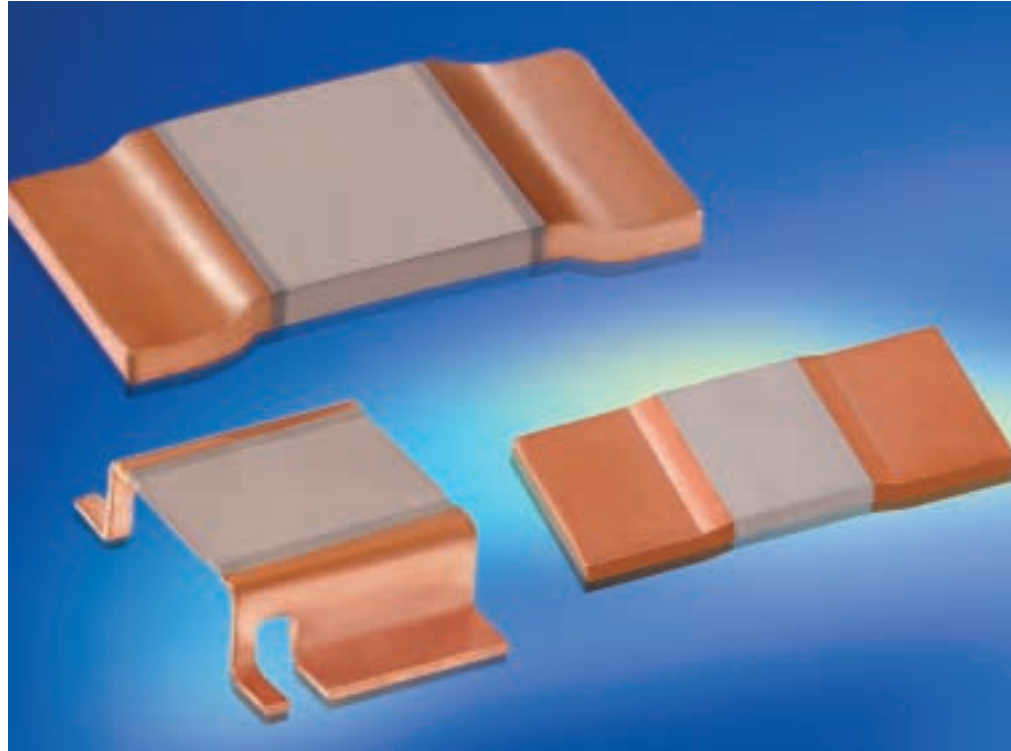
DESIGN & ELEKTRONIK

PRODUKTE UND KNOW-HOW FÜR DEN ELEKTRONIK-ENTWICKLER

Stromsensorik in der Kfz-Elektronik

Nicht ausgedient

Seit Jahrzehnten ist der Strommesswiderstand, der so genannte »Shunt«, das Bauteil der Wahl, um Strom zu messen. Daran wird sich aufgrund der stetigen Weiterentwicklung auch nichts ändern. Dieser Beitrag geht auf die wichtigsten Parameter eines Shunts ein und zeigt, was beim Ein-designen zu beachten ist.



Der Erfassung des fließenden Stroms und dessen Regelung kommt in der gesamten Elektronik und insbesondere der Kfz-Elektronik immer größere Bedeutung zu, da mehr Verbraucher elektrisch gesteuert werden müssen, da eine höhere Dynamik auch größere Ströme erforderlich macht und da letztendlich der

Zwang zu rationellerem, sparsamerem Einsatz elektrischer Energie immer stärker wird. Grundsätzlich stehen mit den magnetischen Stromsensoren und den so genannten Shunts zwei physikalisch vollkommen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung, die sich in den letzten Jahrzehnten in gewissen Marktsegmenten etabliert haben.

Als Vorteile magnetischer Sensoren (Stromwandler, Hall-Sensoren, u.a.) sind vor allem die Potenzialfreiheit und die niedrige Verlustleistung zu nennen. Deshalb kommen diese Sensoren

Dr. Ullrich Hetzler
leitet die Abteilung Forschung
& Entwicklung bei der
Isabellenhütte

Eigenschaften/Forderungen	Material	Bauform	Verfahren
niedriger TK	xxx	x	x
hohe Langzeitstabilität	xxx	x	x
niedrige Thermospannung	xxx	x	xx
niedrige Induktivität	x	xxx	
hohe Genauigkeit			xxx
hohe Belastbarkeit	x	xxx	
kleiner Wärmewiderstand		xxx	x
Vierleiterausführung		xxx	
niedriger Gesamtwiderstand		xxx	x
hohe Sicherheit	xx	x	x
niedriger Preis	x	xx	xxx

Tabelle 1 Einfluss von Material, Bauform und Produktionsverfahren auf die Eigenschaften eines Shunts (je mehr »x«, desto höher die Abhängigkeit)

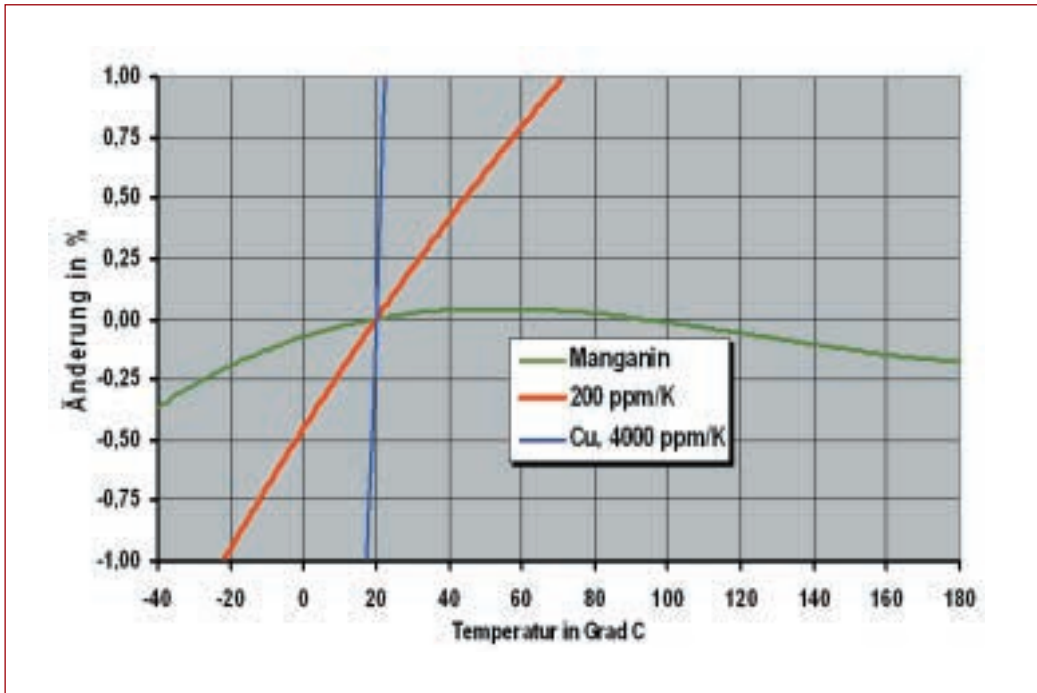


Bild 1 Temperaturkoeffizient von Kupfer und Manganin

heute vor allem in der Antriebstechnik und bei großen Strömen zum Einsatz. Als Nachteile sind vor allem Bauvolumen, Offset und Linearität zu nennen.

Der Zwang zur Miniaturisierung und die Verfügbarkeit extrem niederohmiger, nahezu fehlerfreier Widerstände, verbunden mit einer weitaus verbesserten Messwerterfassung, eröffnete jedoch dem »alten« Shunt-Widerstand in den letzten Jahren ein Revival und erschloss neue Anwendungsfelder an die noch vor zehn Jahren niemand gedacht hätte.

Die Steuerung und Regelung von Aktoren im Kfz erfordert meist Ströme im Bereich von 1 A bis 100 A, in Sonderfällen (z. B. die Lambdasonden-Vorheizung) fließen aber auch kurzzeitig 300 A oder beim Anlasser sogar bis 1500 A. Im Bereich Batterie- und Powermanagement ist die Situation noch extremer, denn hier liegen im Betrieb des Fahrzeuges die Dauerströme bei 100 A bis 300 A, während

im Ruhezustand nur wenige Milliampere sicher erfasst werden müssen.

Bei der Stromerfassung über einen Widerstand wird nach dem Ohmschen Gesetz der Spannungsabfall als direktes

Maß für den Strom ausgewertet. Das ist völlig unkritisch bei Widerstandswerten über einem Ohm und Strömen von einigen hundert Milliampere. Die Situation ändert sich aber vollständig

wenn Ströme im Bereich oberhalb 10 A bis 20 A im Spiel sind, denn jetzt kann im Allgemeinen die im Widerstand entstehende Verlustleistung ($P=R \cdot I^2$) nicht mehr vernachlässigt werden. Man wird versuchen die Verlustleistung durch niedrigere Widerstandswerte zu begrenzen, aber da gleichzeitig auch die Messspannung niedriger wird, ist der Widerstandswert oft durch die endliche Auflösung und Güte der Auswertelektronik begrenzt. Allgemein gilt für die am Widerstand gemessene Spannung: $U = R \times I + U_{th} + U_{ind} + U_{iext} + \dots$, wobei U_{th} die Thermospannung, U_{ind} die induzierte Spannung und U_{iext} der Spannungsabfall an den Zuleitungen darstellen. In diesen Fällen können die nicht von einem Stromfluss verursachten Fehlerspannungen das Messergebnis völlig verfälschen, weshalb der Designer die Ursachen kennen und deren Einfluss minimieren sollte, indem er das Lay-

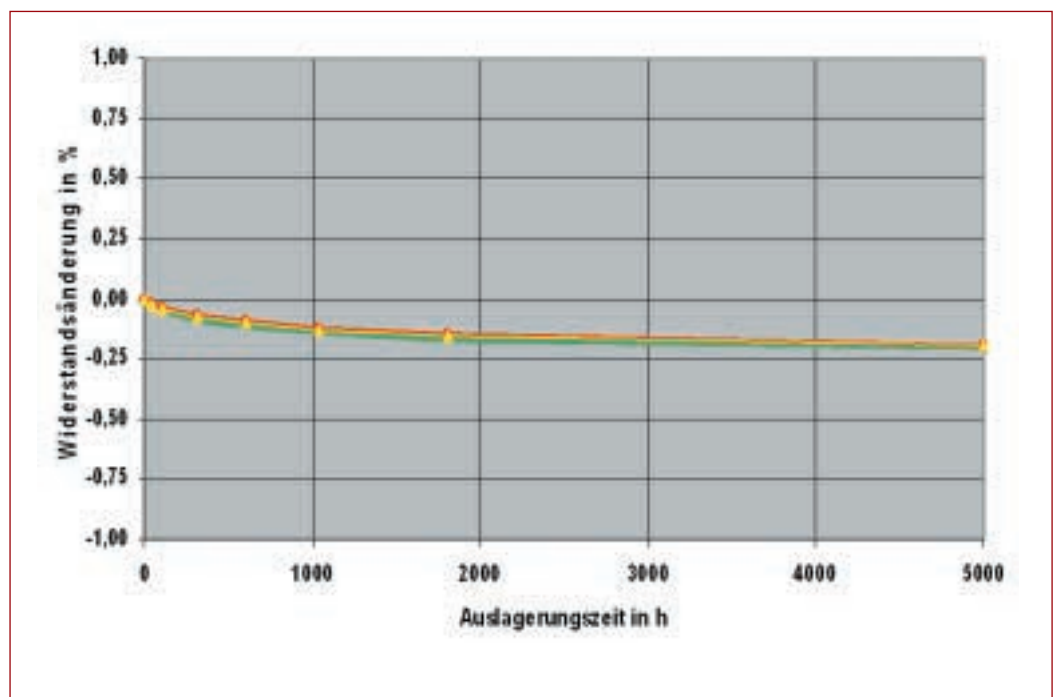


Bild 2 Ein SMD-Widerstand wird über 5000 Stunden bei +140 °C ausgelagert. Die geringe Drift zeigt, dass er langzeitstabil ist.

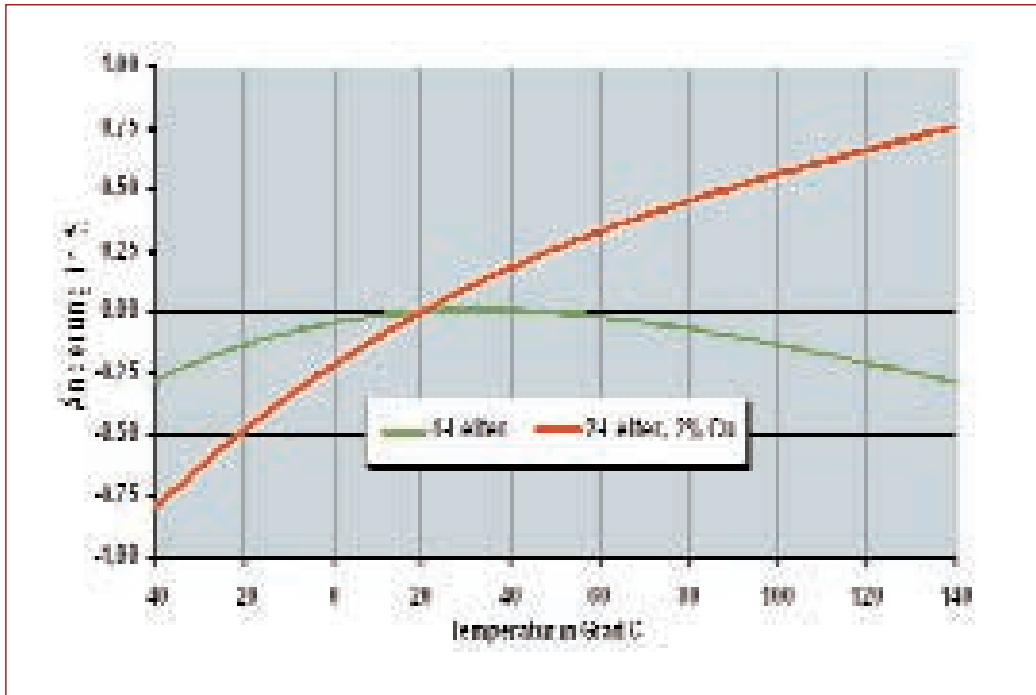


Bild 3 Änderung des Gesamtwiderstandes über die Temperatur. Darauf hat die Anschluss-technik (4-Leiter oder 2-Leiter) eine signifikante Auswirkung.

out sorgfältig abstimmt und vor allem geeignete Bauelemente auswählt.

Ein elektrischer Widerstand kann im Grunde aus irgendeinem leitfähigen Material hergestellt werden. Zur Strommessung ist ein solches Bauelement aber sicher nicht geeignet, da der Widerstandswert von Parametern wie Temperatur, Zeit, Spannung, Frequenz usw. abhängig sein wird. Da der ideale, von diesen Parametern völlig unabhängige Messwiderstand natürlich nicht existiert, wird der reale Widerstand durch die in der Tabelle angegebenen Eigenschaften wie Temperaturkoeffizient (TK), Langzeitstabilität, Thermospannung, Belastbarkeit, Induktivität, Linearität usw. beschrieben. Einige dieser Eigenschaften sind im Wesentlichen materialbedingt, andere werden stark durch die Bauart beeinflusst und wieder andere werden im Produktionsverfahren bestimmt, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Alte und neue Materialien

Bereits im Jahr 1889 entwickelte die Firma Isabellenhütte die Präzisionswider-

standslegierung Manganin, deren Eigenschaften seit dieser Zeit Basis für die Präzisionsmesstechnik ist, z.B. in Normalwiderständen. Die weiteren Legierungen Isa-

ohm und Zeranin runden den Bereich der spezifischen Widerstände mit $132 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ bzw. $29 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ nach oben und unten ab. Alle Legierungen erfüllen weitgehend die materialbedingten Forderungen und sind seit vielen Jahren im Einsatz.

Als Antwort auf Weiterentwicklungen bei magnetischen Materialien hat sich die Isabellenhütte in den letzten 25 Jahren zum Ziel gesetzt, durch physikalische Optimierung des Shunt-Widerstandes den sinnvoll nutzbaren Bereich für Präzisionsstrommessung mit Widerständen nach oben auszudehnen. Hand in Hand mit der Verbesserung von Offset, TK und Rauschen von Operationsverstärkern konnten die Widerstandswerte bis in den unteren Milliohm-Bereich reduziert werden, sodass das Hauptproblem der hohen Verlustleistung bei großen Strömen weitgehend beseitigt werden konnte. Gleichzeitig nimmt aber der durch Fehlerspan-

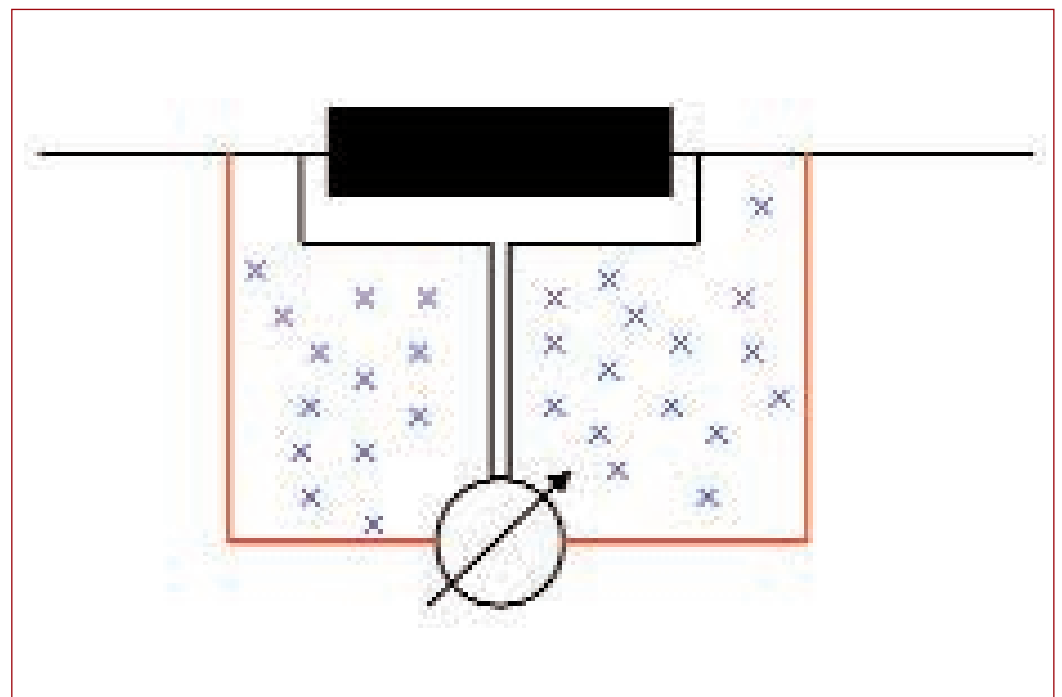


Bild 4 Mithilfe der Strip-Line-Technik (schwarz) lassen sich die durch ein Magnetfeld (blaue Kreuze) induzierten Störspannungen minimieren

SMX-Serie

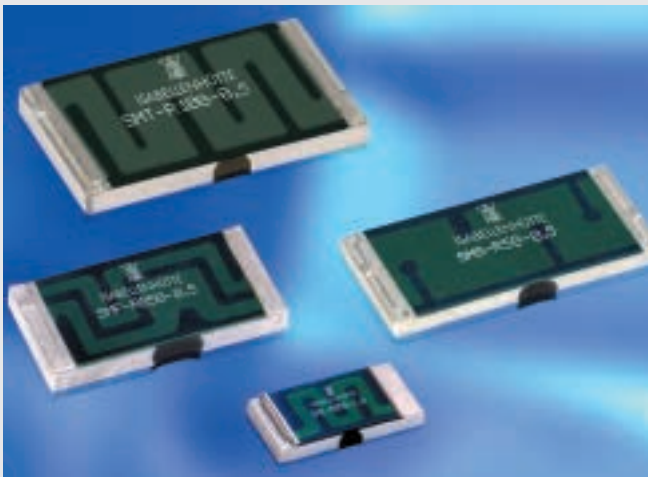
Die SMX-Baureihe benutzt ein Kupfersubstrat, das auch gleichzeitig Wärmesenke und elektrischer Kontakt darstellt. Dies ermöglicht die vollständige Übertragung der Manganin-Eigenschaften in das Bauelement und eine hohe Dauer- und Pulsbelastbarkeit sowie eine niedrige Induktivität.

Kennwerte:

- Widerstandsbereich: 5 mΩ bis 5 Ω
- Bauformen: 2816, 2512, 2010, 1206
- Belastbarkeit: 3 W, 2 W, 1 W, 0,5 W
- Toleranz: bis 0,5%
- Wärmewiderstand: bis 10 K/W

Anwendungen:

Benzin- und Diesel-Direkteinspritzung, Getriebesteuerung, Lichtsteuermodule, Stromüberwachung einzelner Zweige im Fahrzeug sowie Motorsteuergeräte



LMX-Serie

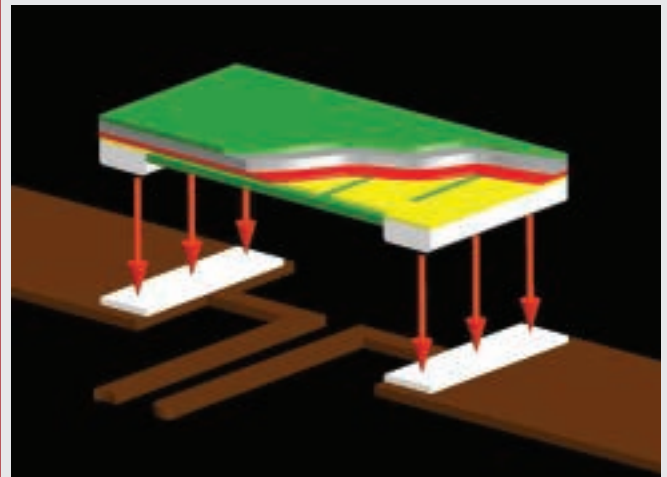
Diese neue Low-Cost-Ausführung ist für die Flip-Chip-Montage vorgesehen und bietet als Zweileiterausführung extrem niederohmige Werte ab 1 mΩ. Bei Werten unter 3 mΩ wird kein Substrat benutzt, bei höheren Werten dient ein isoliertes, oben liegendes Aluminium-Substrat als Trägermaterial und Wärmebrücke über die die Verlustwärme effizient zu den Kontakten hingeführt wird.

Kennwerte:

- Widerstandsbereich: 1 mΩ bis 0,5 Ω
- Bauformen: 2512, 2010, 1206, 0805
- Belastbarkeit: 2 W, 1 W, 0,5 W, 0,25 W
- Toleranz: bis 1%
- Wärmewiderstand: bis 15 K/W

Anwendungen:

Zündsteuermodule, Getriebesteuerung, Motorsteuergeräte, Türheber



nungen (Einstreuungen, Thermospannungen, u.a.) verursachte relative Fehler sehr stark zu, wodurch Eigenschaften wie niedrige Induktivität und Thermospannungsfreiheit stark an Bedeutung gewinnen. Im Folgenden wird kurz auf die wichtigsten Parameter eingegangen.

Bild 1 zeigt den typischen parabelförmigen Temperaturgang von Manganin-Widerständen. Da diese Eigenschaft allein durch die Materialzusammensetzung bestimmt ist, lassen sich Widerstände mit sehr hoher Reproduzierbarkeit und sehr

geringer Chargenstreuung herstellen. Der Temperaturkoeffizient wird in ppm/K angegeben und ist wie folgt definiert: $TK = [R(T) - R(T_0)] / [R(T_0) \cdot (T - T_0)]$.

Als Referenztemperatur T_0 wird meist ein Wert von +20 °C oder +25 °C benutzt. Ist die Temperaturabhängigkeit wie beim Manganin eine gekrümmte Kurve, ist es unbedingt nötig auch die für die TK-Messung benutzte obere Temperatur anzugeben, z.B. TK (20-60). Häufig werden auch im niederohmigen Bereich Dick-schichtwiderstände mit TK-Werten von mehreren hun-

dert ppm/K eingesetzt. Die rote Kurve zeigt, dass bei einem Widerstand mit nur 200 ppm/K schon eine Temperaturänderung von 50 K ausreicht, um die 1%-Grenze zu verlassen. Eine genaue Stromerfassung ist mit solchen Widerständen nicht möglich.

Noch extremer ist der Fall, wenn versucht wird, mit auf der Leiterplatte geätzten Kupferwiderständen zu messen, denn Kupfer besitzt einen TK von 4000 ppm/K (oder 0,4 %/K), d.h. eine Temperaturänderung von 10 K verursacht bereits eine Drift von 4%.

Thermospannung

An der Kontaktstelle verschiedener Materialien entsteht eine so genannte Thermospannung, wenn diese etwas erwärmt oder abgekühlt wird. Dieser Effekt ist vor allem bei niederohmigen Widerständen zu beachten, da hier im Allgemeinen sehr kleine Spannungen gemessen werden müssen und deshalb Thermospannungen im Mikrovolt-Bereich das Ergebnis stark verfälschen können.

Sehr oft wird auch heute noch für drahtgewickelte und gestanzte Shunts das

aus Vorlesungen und Lehrbüchern bekannte Widerstandsmaterial konstant eingesetzt. Dessen TK ist zwar recht gut, aber die Thermospannung gegen Kupfer ist mit zirka $40 \mu\text{V}/\text{K}$ extrem hoch. Schon bei einer Temperaturdifferenz von 10 K entsteht eine Fehlerspannung von $400 \mu\text{V}$, die bei einem $1\text{-m}\Omega$ -Widerstand ein Messergebnis von 4 A schon um 10% verfälscht. Noch schlimmer wird die Situation wenn man berücksichtigt, dass unter DC-Strombelastung der Peltiereffekt eine Temperaturdifferenz von mehr als 20 K erst aufbauen kann. (In Extremfällen wurde sogar ein einseitiges Auslöten solcher Widerstände beobachtet.) In diesen Fällen wird auch bei konstantem Stromfluss eine scheinbare Stromänderung beobachtet – bedingt durch den Aufbau der Temperaturdifferenz bzw. der Thermospannung. Nach Abschalten des Stromes wird dann ein scheinbarer, zeitlich mit der Temperaturdifferenz verschwindender Stromfluss gemessen. Die oben genannten Präzisionswiderstandslegierungen sind thermoelektrisch der »Kupfer-Welt« exakt angepasst, sodass diese Effekte völlig vernachlässigbar sind. So fällt beispielsweise über einem $0,3\text{-m}\Omega$ -Widerstand unmittelbar nach Abschalten eines Stromes von 100 A eine Spannung von weniger als $1 \mu\text{V}$ (entsprechen 3 mA) ab. Für einen Sensor ist natürlich die Stabilität über der Zeit extrem wichtig, denn der Anwender will sich auch nach Jahren im Einsatz noch auf eine einmal erfolgte Kalibrierung verlassen können. Für die Widerstandsmaterialien bedeutet dies, dass sie korrosionsstabil sein müssen und im Laufe ihrer Lebensdauer keinerlei metallur-

gisch bedingte Umwandlungen durchlaufen dürfen. Die Legierungen Manganin, Zeranin und Isaohm erfüllen diese Forderungen als homogene Mischkristall-Legierungen, die zusätzlich sorgfältig gegläht und stabilisiert sind und deshalb im thermodynamischen Grundzustand vorliegen. Mit solchen Legierungen sind tatsächlich Stabilitätswerte im ppm-Bereich pro Jahr möglich.

Bild 2 zeigt die Verhältnisse bei einem realen SMD-Widerstand, der über 5000 Stunden bei $+140 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgelagert wird. Die geringe Drift von etwa $-0,2\%$ wird durch Ausheilen von letzten, durch geringe Umformungen während der Produktion verursachten Gitterfehlern verursacht und zeigt, dass sich die Bauteile weiter stabilisieren d.h. immer besser werden. Da die Driftgeschwindigkeit sehr stark von der Temperatur abhängt, ist dieser Effekt bereits bei $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ fast nicht mehr nachweisbar.

Anschlussstechnik

Bei niederohmigen Widerständen ist der Einfluss der Zuleitungen oft nicht mehr vernachlässigbar, weshalb die Spannungsmessung über zwei zusätzliche Anschlüsse direkt am Widerstandsmaterial erfolgen sollte. Hat die Kupferleiterbahn, welche die Zuleitung bildet, beispielsweise die Dimensionen $4 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm} \times 35 \mu\text{m}$ ($L \times B \times H$), so hat sie einen Widerstand von $10 \text{ m}\Omega$. Bei einem $10\text{-m}\Omega$ -Messwiderstand würde ein kurzes, 4 mm langes Stück Leiterbahn im Messkreis den Widerstand bereits um 100% verfälschen. Der Zusatzwiderstand der Zuleitungen kann zwar durch einen Abgleich eliminiert werden, allerdings kann er den TK des Gesamtwiderstandes sehr

stark verfälschen wie Bild 3 zeigt. Das soll zeigen, welchen Einfluss unsachgemäße Konstruktion des Widerstandes oder ein Layoutfehler haben können.

Auch wenn in dem Beispiel aus Bild 3 der Kupferanteil mit nur 2% extrem klein ist (im Gegensatz zu 24% im obigen Beispiel), steigt der TK von nahezu Null auf ungefähr $+80 \text{ ppm}/\text{K}$. Das bedeutet, dass die oft geübte Praxis in Datenblättern absolut unzulässig ist, den TK des verwendeten Widerstandsmaterials anzugeben. Bei Widerständen aus elektronenstahl-geschweißtem Verbundmaterial Cu-Manganin-Cu ist der Zuleitungswiderstand tatsächlich so niedrig, dass mit einem geeigneten Layout wieder ein Zweileiterwiderstand eingesetzt werden kann, da das Zusammenwirken von Layout, Verlötung und Widerstand den Vierleiteranschluss realisiert. Allerdings ist beim Layout sorgfältig darauf zu achten, dass der Stromfluss im Widerstand nicht die Spannungsanschlüsse (Senseleitungen) tangiert.

Da die Wärmeleitfähigkeit von Widerstandsmaterialien im Vergleich zu Kupfer relativ schlecht ist und im Allgemeinen dünne Folien benutzt werden, ist es nicht möglich, die in Wärme umgesetzte Verlustleistung über das Widerstandsmaterial abzuführen. Bei Isa-Plan-Widerständen wird deshalb die Widerstandsfolie mit einem dünnen, wärmeleitfähigen Kleber mit einem ebenfalls gut Wärme leitenden Substrat (Kupfer oder Aluminium) verbunden. Auf diese Weise wird die Verlustwärme sehr effektiv über das Substrat und die Kontakte nach außen abgeführt, was sich letztendlich in einem vergleichsweise niedrigen inneren Wärmewiderstand (ty-

pisch $10 \text{ K}/\text{W}$ bis $30 \text{ K}/\text{W}$) widerspiegelt.

Das wiederum hat zur Folge, dass die Widerstände mit der vollen Leistung bis zu einer sehr hohen Kontaktstellentemperatur belastbar sind, d.h. der Knickpunkt der Lastminderungskurve (Derating) liegt sehr hoch. Gleichzeitig wird aber auch die Maximaltemperatur im Widerstandsmaterial niedrig gehalten, was die Langzeitstabilität unter Belastung und die durch den TK bedingte reversible Widerstandsänderung erheblich verbessert.

Bei den aus Verbundmaterial hergestellten extrem niederohmigen Ausführungen sind der Manganinquerschnitt und damit die mechanische Stabilität so groß, dass hier kein Substrat nötig ist. Hier ist dann auch die Wärmeleitfähigkeit des Widerstandsmaterials ausreichend, um vergleichsweise niedrige Wärmewiderstände zu erzielen. Dieser liegt beim $1\text{-m}\Omega$ -Widerstand bei etwa $10 \text{ K}/\text{W}$ und beim $100\text{-}\mu\Omega$ -Widerstand sogar bei $1 \text{ K}/\text{W}$.

Niedrige Induktivität

Da heute in sehr vielen Anwendungen getaktete Ströme gemessen und geregelt werden müssen, gewinnt die Induktivität des Shunts stetig an Bedeutung. SMD-Widerstände werden niederinduktiv als ebene, flache Ausführung ohne oder mit eng beieinander liegenden Mäandern hergestellt. Die diamagnetischen Eigenschaften der Präzisionslegierungen, das metallische Substrat sowie der Vierleiteranschluss tragen weiter zur Verbesserung bei.

Allerdings bilden die Senseleitungen mit dem Widerstand zusammen eine Antenne, in der das durch den Stromfluss erzeugte Magnetfeld und an-

dere externe Magnetfeldänderungen Störspannungen induzieren. Daher ist es besonders wichtig, die von diesen Leitungen umschlossene Fläche so klein wie möglich zu halten. Optimal ist eine Ausführung in Strip-Line-Technik, d.h. beide Leitungen werden deckungsgleich auf zwei Ebenen übereinander zum Messverstärker geführt (Bild 4). Bei nicht sachgemäßer Ausführung (rote Linien) kann dieser Antenneneffekt den Einfluss der echten Induktivität des Widerstandes um Größenordnungen übersteigen. Bei hohen Strömen und niedrigen Widerstandswerten

ten ist zwar eine Vierleiterausführung angebracht, trotzdem ist z.B. die oft benutzte Stanzeillösung aus einem Manganblech nicht die beste Lösung, denn hier ist zwar der Vierleitermesswiderstand, dessen TK und Thermospannung in Ordnung sind, aber der Gesamtwiderstand und der Widerwiderstand sind zum Teil um das Zwei- bis Dreifache höher als der eigentliche Messwiderstand. Die Folge ist eine entsprechend höhere, oftmals unzulässige Verlustleistung und Temperatur im Widerstand. Hinzu kommt, dass sich Widerstandsmaterialien durch

Schraub- und Lötverbindungen nur schlecht mit Kupfer verbinden lassen, was einen erhöhten Übergangswiderstand und damit weitere Verluste zur Folge hat.

Diese Fehler sind bei den aus Verbundmaterial gestanzten Widerständen weitgehend eliminiert. Der Gesamtwiderstand ist um weniger als 10% erhöht und der Kunde kann auf bewährte Cu-Cu-Verbindungstechniken zurückgreifen.

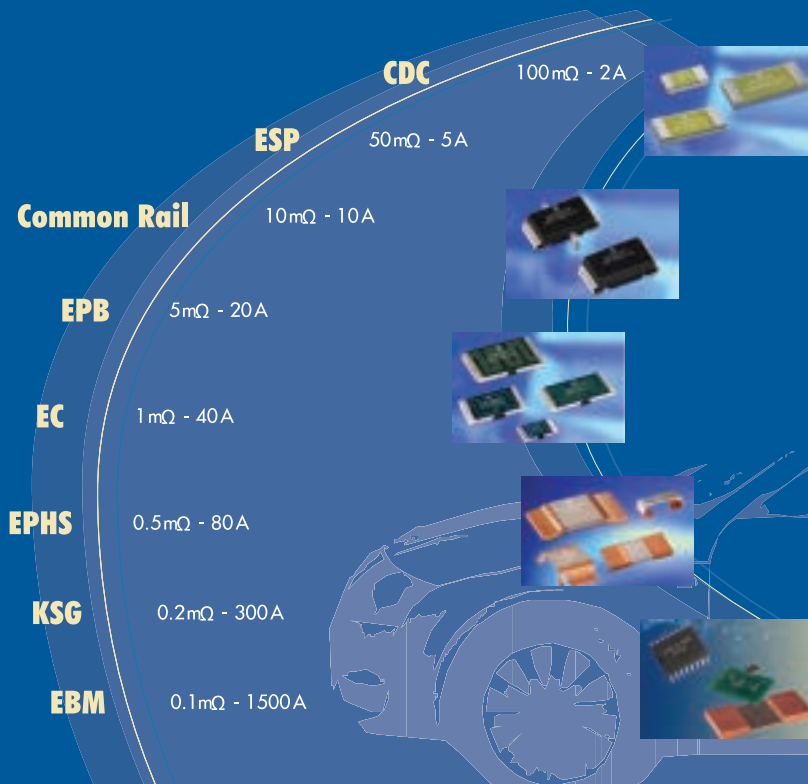
Aus Kosten- und Miniaturisierungsgründen werden für die Stromerfassung bis 100 A im Kfz in zunehmendem Umfang SMD-Ausführungen mit Widerstands-

werten ab 300 $\mu\Omega$ verwendet. Für den Automotive-Bereich hat die Isabellenhütte beispielsweise die Serien SMX, LMX, und BVX geschaffen. Allen gemeinsam ist die Zweileiterausführung und der physikalisch optimierter Aufbau, der durch angepasste Gestaltung des Leiterplattenlayouts eine völlig korrekte Messung in Vierleitertechnik ermöglicht. (rh)

Isabellenhütte Heusler

Telefon 0 27 71/93 42 40
Fax 0 27 71/23 03 0

Current controls the car. We control the current.



ISABELLENHÜTTE
Heusler GmbH & Co. KG

Telefon: +49 (27 71) 9 34-2 82
vk.bauelemente@isabellenhuette.de
www.isabellenhuette.de
www.isa-asic.de