

# 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR



Pressinformation 10/2020

*„1 Tera-Ohm? Wer braucht denn sowas?“ oder „Das ist ja eine sehr gute Isolation“.*

So oder ähnlich könnte eine typische Reaktion eines Elektronikers sein, dem solch hohen Widerstandswerte nur sehr selten begegnen.

Aber wozu kann man diese sehr hochohmigen Widerstände verwenden?



## Anwendungen bei extrem kleinen Signalen

Gerade im Bereich der Sensorik und der Messtechnik gibt es viele Anwendungen, in denen Sensoren mit sehr kleinen Strom- oder Spannungsausgangssignalen Verwendung finden (Photodioden, Elektron/Photomultiplier, Ion Chambers, Farady Cups). Diese Signale müssen zunächst in der Messkette mit einem analogen Front-End konditioniert werden, damit sie anschließend digital weiterverarbeitet werden können. Üblicherweise besteht diese Signalkonditionierung zunächst aus einer Verstärkung und Entkopplung des Eingangssignals. Paradebeispiel ist hier eine Photodiode, deren kleines Photostromsignal in Low Level Light Anwendungen mittels Transimpedanzverstärker (TIA) verstärkt und als proportionaler Spannungswert ausgegeben wird. Um hier sehr hohe Verstärkungen zu erreichen, braucht man Rückkoppelwiderstände im Bereich von 1 GOhm bis zu 10 TOhm. Für messtechnische Anwendungen ist es außerdem wichtig, dass die Nebenparameter, nämlich der Temperaturkoeffizient (TK) und der Spannungskoeffizient (VCR) ebenfalls möglichst klein sind, damit keine unerwünschten Nichtlinearitäten bei Temperatur- oder Spannungsänderung auftreten.

## Die Widerstände

Solch hochohmigen Dickschicht-Widerstände befolgen nämlich nicht mehr das ohmsche Gesetz, d.h. sie sind nichtlinear und ändern ihren Widerstandwert in Abhängigkeit von der angelegten Spannung. Der VCR berechnet sich analog dem TK wie folgt:

$$\text{VCR [ppm/V]} = (R2/R1 - 1) / (V2 - V1) \times 1.000.000$$

## 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR



### Pressinformation 10/2020

Übliche verwendete Spannungsbereiche sind z.B. 30V/300V oder 10V/100V.

Die Spannungskoeffizienten liegen im Gigaohmbereich typischerweise in der Größenordnung von 1000 ppm/V.

Gerade hinsichtlich dieser Eigenschaft können die SMD Dickschichtwiderstände von SRT in Baugröße 2512 überzeugen. SRT Resistor Technology ist es durch eine ausgeklügelte Kombination von Design, Paste, Druckparameter und Brennprofil gelungen, einen Widerstand im Bereich von 1 TOhm herzustellen, der die beiden wichtigsten Nebenparameter eines Hochohmwiderstandes - nämlich TK und VCR - optimiert.

### Herausforderungen bei den Messungen/Messprozedere

Es wurden 10 Bauteile einer Charge, die möglichst nahe bei 1 Tera-Ohm liegen, herausselektiert und hinsichtlich TK und VCR gemessen. Aufgrund des sehr hohen Widerstandswertes ergeben sich Messprobleme, die bei 1 MOhm völlig unerheblich sind. Die Messung des TK und VCR wurde mit einem Keysight B2987A sowie stichprobenartig auch mit einem Keithley 6517B Elektrometer durchgeführt. Die Widerstandsmessung findet in diesem Widerstandsbereich nicht spannungsgenau über den Spannungsabfall statt, sondern mit einem Elektrometer, indem eine Spannung am DUT aufgeprägt wird und der Strom gemessen wird (stromgenau, FVMI = Force Voltage Measure Current Methode). Zu beachten ist hier, dass auch die Spannungsquelle die eingestellte Spannung mit der entsprechenden Genauigkeit ausgibt, da bei der FVMI-Methode der Widerstand mittels nominell eingestellter Spannung dividiert durch den gemessenen Strom bestimmt wird. D.h. man muss sehr genau auf die eingestellten Bereiche achten, sowohl source-seitig als auch drain-seitig.

Die Messungen wurden generell mit einer PLC von 10 durchgeführt; die Wartezeiten vor Ableseung bzw. Messbeginn waren immer mindestens 5 Minuten, z.T. erheblich länger. Es wurde darauf geachtet, dass auf dem Display über die Dauer von 100 s Anzeigehistorie

## 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR



### Pressinformation 10/2020

keine ersichtlichen Anstiege oder Abfälle zu erkennen waren.

Bei den höheren Spannungswerten reicht eine Ablesung des Zahlenwertes.

Der VCR wurde für diese Untersuchung in drei Bereichen gemessen:

- von 2 V bis 20 V,
- von 20 V bis 200 V und
- von 200 V bis 1000 V.

Mit dieser Wahl werden – wie unten ausgeführt - potentiell auftretenden Ungenauigkeiten vermieden, die bei der Messbereichsumschaltung für den Messstrom bei einem Widerstandswert von ca. 1 TOhm entstehen können.

Bei der Messung eines so kleinen Effektes (z.B. VCR 10 ppm/V) gibt es zwei wesentliche messtechnische Herausforderungen:

- a. Den zu untersuchenden Effekt genau genug zu messen,
- b. Störungen und konkurrierenden Effekte entsprechend klein zu halten.

Punkt a ist trivial, wird aber oft übersehen oder als gegeben angenommen – 10V mit einer Genauigkeit im Bereich von unter 10ppm zu messen, ist ja relativ einfach. Hier in diesem Fall bedeutet es, dass z.B. 1 TOhm respektive 2 pA (bei 2 V) mit mindesten 4 signifikanten Stellen sicher, praktisch mit 5 Stellen gemessen werden müssen – d.h. im Bereich von wenigen Femto-Ampere (fA). Ansonsten führt schon alleine der Ablesefehler zu einer Änderung/Effekt in der Größenordnung von 10 ppm/V.

*Beispiel VCR zwischen 20 V und 100 V: Ablesefehler: statt 1,000 TOhm nun 1,001 T Ohm => vermeintlicher VCR = 12 ppm/V. Bei geringeren Spannungsdifferenzen wird das noch viel kritischer (2 V/20 V => vermeintlicher VCR = 55 ppm/V).*

Punkt b ist eigentlich auch klar, jedoch wird das bei Änderungen von wenigen 10 fA auch oft unterschätzt. Die Folge ist, dass fälschlicherweise eine Änderung für den zu untersuchenden Effekt gehalten wird bzw. sich diese gegenseitig kompensieren.

## 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR



### Pressinformation 10/2020

Ein Beispiel: Der VCR betrage 10 ppm/V, gemessen wird zwischen 20 V und 100 V, d.h. wir haben eine Gesamtänderung von  $\Delta R/R = 800$  ppm. Der konkurrierende/störende Effekt muss unter ca. 80 ppm gehalten werden, damit der Fehler  $\pm 5\%$  nicht übersteigt. Das bedeutet bei einem TK von 160 ppm/K, dass die Temperatur auf ca. 0,5 Kelvin genau gehalten werden muss. Bei einem kleineren Spannungshub (z.B. 8 V) muss die Temperatur um einen Faktor 10 besser konstant gehalten werden. Analog ist das auch für andere Einflussfaktoren gültig (z.B. Luftfeuchtigkeit).

Natürlich muss auch der Offset des Messinstrumentes speziell bei kleinen Spannungen beachtet werden, da hier nur wenige Pico-oder Femto-Ampere gemessen werden. Ein vorhandener Offset kann aber durch Messung mit alternierender Spannung weitgehend eliminiert werden, wenn die Messungen zeitlich nicht zu lange auseinanderliegen. Nichtlinearitäten im Messbereich bzw. Sprünge beim Wechsel der Messbereiche sind weitere Fehlerfaktoren. Letzterer kann durch geeignete Wahl des Spannungsbereiches vermieden werden; bei der Nichtlinearität muss man sich auf die Herstellerangaben verlassen, wenn vorhanden. Die oben angesprochene Genauigkeit der Spannungsausgabe wird durch den Spannungshub verbessert, jedoch können bei einem kleinen Spannungsintervall von z.B. 2 V – 20 V auch hier wenige ppm/V zusammenkommen.

Die Messungen an den 10 Bauteilen wurden jeweils zweimal durchgeführt und fanden weitgehend am späten Nachmittag statt, damit keine Störungen von anderen Maschinen entstehen und auch keine anderen Störungen vorhanden waren (Bewegung von Mitarbeitern, Publikumsverkehr, Nutzung von Handy, etc.). Die Bauteile wurden gründlich in Aceton gereinigt und dann nur noch mit einer Pinzette berührt.

# 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR

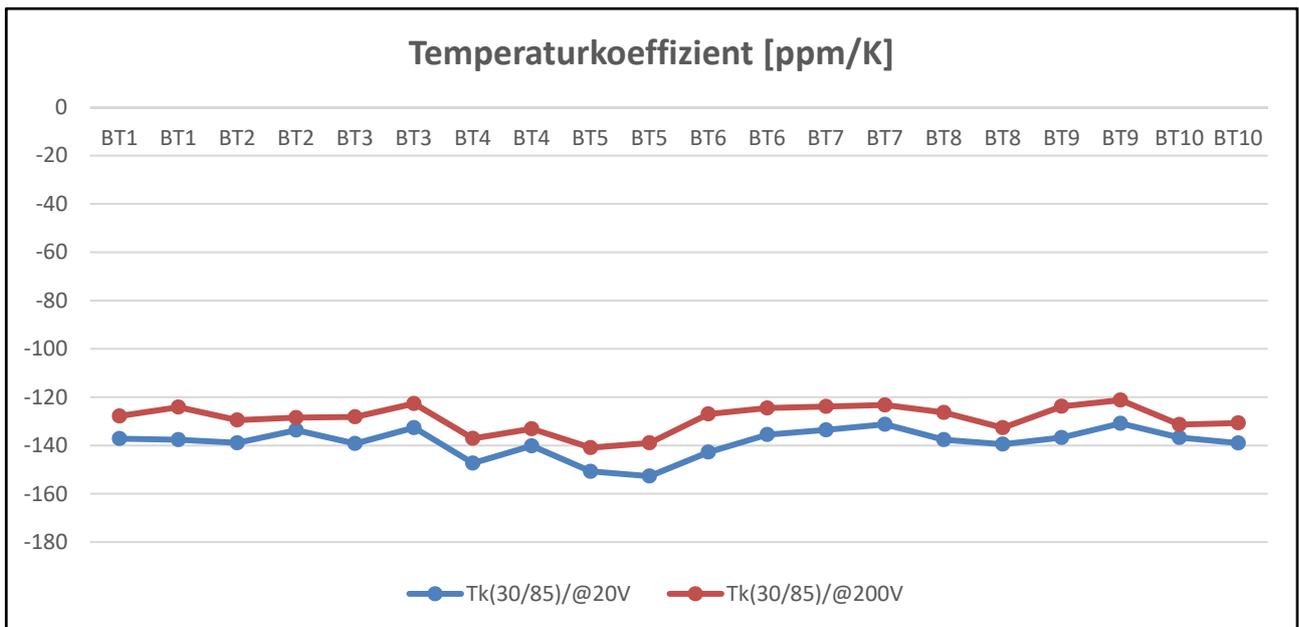


Pressinformation 10/2020

## Ergebnisse

In untenstehender Tabelle sind die Messergebnisse für die TK Messung zusammengestellt. Der TK wurde zw. 30°C und 85°C mit zwei verschiedenen Spannungen gemessen, respektive bei 20 V und 200 V.

Messspannung	T <sub>low</sub>	T <sub>high</sub>	TK	Standardabweichung
20V	30°C	85°C	-138,7 ppm/K	± 5,9 ppm/K
200V	30°C	85°C	-128,7 ppm/K	± 5,5 ppm/K



Der Temperaturkoeffizient ist mit -138,7 ppm/K und -128,7 ppm/K bei diesem Widerstandswert ausgezeichnet gut; solche Werte werden oft nicht für wesentlich geringere Widerstandswerte erreicht. Die unterschiedlichen Messspannungen und damit die elektrischen Potentiale im Material führen offensichtlich zu einer kleinen Änderung des TK, bei höheren Spannungen sinkt der TK. Die untere Temperatur bei der TK-Messung wurde auf 30°C gelegt, damit keine Feuchtigkeit auf dem Bauteil kondensiert und einen Nebenschluss erzeugt.

Änderungen vorbehalten

Ausgabe 10-2020

# 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR

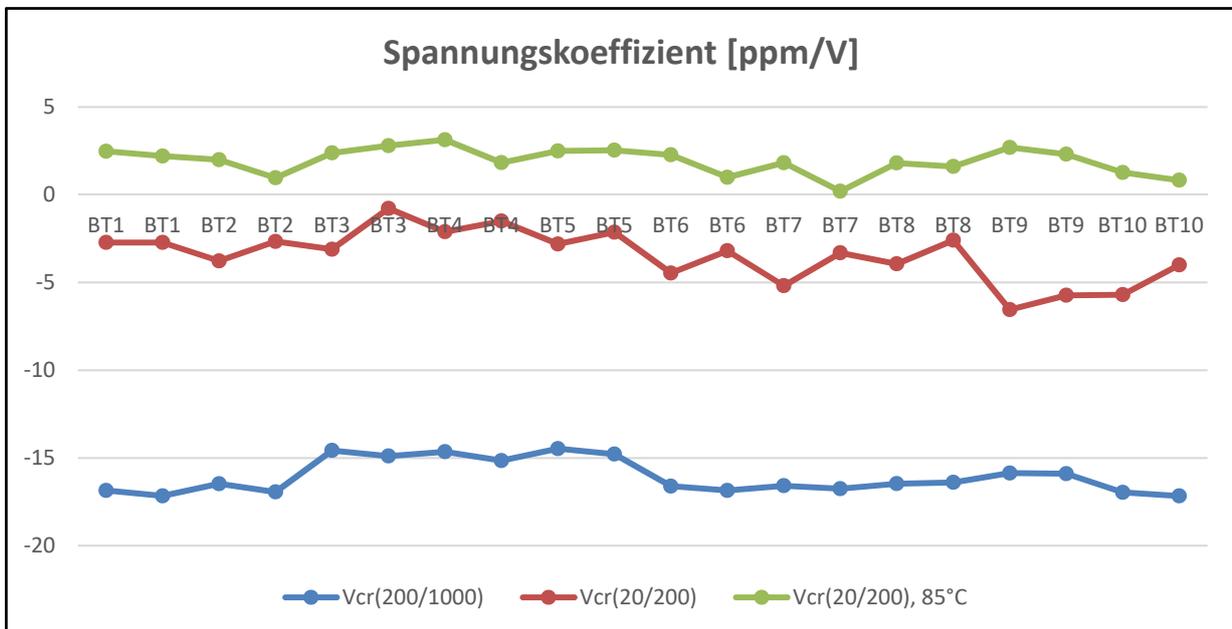


## Pressinformation 10/2020

In nachfolgender Tabelle sind die Messergebnisse für die VCR-Messung zu sehen. Wie schon oben erwähnt, wurde der VCR in drei Bereichen gemessen, nämlich von 2 V - 20 V, von 20 V - 200 V und von 200 V - 1000 V.

Der VCR zwischen 20 V und 200 V wurde zusätzlich bei 85°C gemessen.

V <sub>low</sub>	V <sub>high</sub>	VCR	Standardabweichung
200 V	1000 V	- 16,1 ppm/K	± 1,0 ppm/K
20 V	200 V	- 3,4 ppm/K	± 1,4 ppm/K
2 V	20 V	- 144 ppm/K	± 78 ppm/K
2 V	200 V	- 19,6 ppm/K	± 7,1 ppm/K
<b>@85°C:</b>			
20	200	+1,9	± 0,8 ppm/K



Der Spannungskoeffizient ist mit -16,1 ppm/V und -3,4 ppm/V im Bereich 20 V bis 1000 V exzellent und sucht bei diesem Widerstandswert seinesgleichen. Im Spannungsbereich 2 V bis 20 V wirkt sich der Messfehler bei 2 V (entspricht 2 pA) massiv aus, hier ist auch der

## 1 Tera-Ohm auf 25 mm<sup>2</sup> in SMD als Baugröße 2512 bei gutem TK und exzellentem VCR



### Pressinformation 10/2020

Spannungshub am kleinsten. Daraus resultieren VCR-Werte, die weit höher liegen und eine sehr große Streuung besitzen. Eine bessere Messung würde hier einen enorm hohen Aufwand an Messtechnik und Infrastruktur bedeuten. Der VCR liegt hier um -144 ppm/V mit einer Standardabweichung von 78 ppm/K; würde man den Bereich 2 V bis 200 V mit den gleichen Messdaten verwenden, wäre der VCR bei rund 20 ppm/V. Um hier noch genauere und bessere Messwerte erzielen zu können, ist ein erheblicher messtechnischer und damit finanzieller Aufwand notwendig.

Der VCR ist auch leicht abhängig von der Temperatur, wie man in obiger Graphik sieht. Dabei wurde der VCR bei 30°C und 85°C bestimmt und es zeigt sich, dass der VCR bei 85°C leicht positiv ist. Das ist ein überraschendes Ergebnis, da der VCR nach Kenntnis und Erfahrung von SRT immer negativ ist. D.h. bei einer bestimmten Temperatur zw. 30°C und 85°C könnte man einen VCR = 0 erzielen (Nulldurchgang). Dies liegt natürlich auch daran, dass der VCR bei Raumtemperatur so gering ist – bei einem VCR von z.B. -1000 ppm/V könnte man keinen positiven VCR erreichen.

Ein Einfluss durch Selbsterwärmung des Bauteils ist auch bei 1000 V Messspannung praktisch auszuschließen, da die hier umgesetzte Leistung 1 µW beträgt und bei einer angenommenen maximalen Messzeit von 1000 s nur eine Erwärmung im Bereich von ca. 0,02 K aufgrund der Wärmekapazität des gesamten Bauteils zu erwarten ist.

### Zusammenfassung:

Hochohmige Dickschichtwiderstände müssen keinen TK von 1000 ppp/K oder mehr haben. Und auch der VCR kann im zwei- bis einstelligem Bereich bleiben. SRT konnte für einen 1 Tera-Ohm Widerstand der Baugröße 2512 durch eine entsprechende Wahl der Fertigungsparameter die beiden wichtigsten Nebenparameter eines Hochohmwiderstandes – nämlich TK und VCR – optimieren und in dieser Kombination ein beispielloses Bauteil herstellen.

Cadolzburg, 15.10.2020; Dr. Stephan Prucker

Änderungen vorbehalten

Ausgabe 10-2020

**SRT Resistor Technology GmbH**  
Ostlandstr. 31  
D-90556 Cadolzburg



Fon: +49 (0)9103 / 7952-0  
Fax: +49 (0)9103 / 5128  
E-mail: [info@srt-restech.de](mailto:info@srt-restech.de)  
Internet: [www.srt-restech.de](http://www.srt-restech.de)