

Genauigkeit von Multimetern

## Do it yourself

03.05.2016

Von Klaus Höing

**Kalibrierungen sind unbeliebt: Das Messgerät ist für ein paar Tage außer Haus, steht im Produktionsprozess nicht zur Verfügung und das Kalibrieren kostet Budget-Ressourcen. Doch in vielen Fällen reicht eine einfache Überprüfung im eigenen Labor. Was braucht man dazu und wie muss man vorgehen?**



© alphaspirit - Shutterstock

Praxis: Man kauft ein Messgerät, vertraut darauf, dass es durch den Hersteller kalibriert ist und die spezifizierte Genauigkeit einhält – und das über die gesamte Lebenszeit des Messgerätes. Zudem fragt kein ISO-zertifizierter Kunde nach den offiziellen Kalibrierprotokollen, nach denen die gekauften Produkte kalibriert wurden. Offensichtlich ist es so, dass jeder jedem vertraut.

Doch was ist, wenn ganze Chargen von produzierten Geräten zurückgenommen werden müssen, eventuell Anwender zu Schaden kommen und Regressansprüche gestellt werden? Die Lösung sieht so aus: Mit einem Multimeter 3458A, einer Spannungsquelle B2961A (oder B2962A), beides von Keysight, und mindestens zwei Standard-Widerständen von Wekomm RS9010A lässt sich ein hauseigener „Transferstandard“ aufbauen, an dem sich eine präzise Genauigkeits-Verifikation von DC-Messgeräten durchführen lässt, die in der Produktion, Entwicklung und im Lehrbereich eingesetzt sind. Für kleinere und mittlere Betriebe ist das eine kostengünstige Lösung, um die DC-Messgeräte in regelmäßigen Abständen zu überprüfen.

### Warum sollte man die Genauigkeit des Multimeters kennen?

Im Labor und im Produktions-Alltag muss man wissen, wie genau ein Multimeter ist. Um eine „Hausnummer“ zu messen, genügt ein einfaches Handheld-Gerät – das ist aber zu ungenau, wenn man zum Beispiel beim Nullabgleich eines Operationsverstärkers auf 1 mV genau messen will. Schnell kommt die Frage auf: Kann man der Messgerätanzeige trauen?

Ein alltägliches Beispiel eines Labornetzgerätes: Eingestellt auf 3,3 V Versorgungsspannung, geht man davon aus, dass dieser Wert stimmt. Weder fragt jemand danach, ob dem wirklich so ist, noch muss im Entwicklungsprozess dieser Wert dokumentiert werden. Man vertraut dem Hersteller des im Netzgerät

integrierten Messgerätes, man sieht dieses Messgerät als präzise an und das sogar über den gesamten Zeitraum bis zum Lebensende des Netzteils. Aber woher nimmt man die Gewissheit? In beiden Fällen – besonders im Beispiel des Operationsverstärker-Abgleichs – kommt hinzu: Ist die Temperatur- und Alterungs-Drift des verwendeten Multimeters bekannt?

Viele Anwender gehen davon aus, dass qualitativ hochwertige Messgeräte seitens des Herstellers kalibriert sind und die initiale Kalibrierung für eine lange Zeit Gültigkeit hat. Auffallen wird eine Ungenauigkeit erst dann, wenn Messwerte sehr fragwürdig werden beziehungsweise wenn Vergleichsmessungen angestellt werden.

Oft werden mehrere Messgeräte des gleichen Typs gegeneinander verglichen. Das führt letztlich nicht zu einer Gewissheit über die Genauigkeit. Es ist zwar unwahrscheinlich, es kommt jedoch vor, dass eine komplette Serie von Messgeräten in die gleiche Richtung und mit gleichem Koeffizienten driftet. Es kann damit passieren, dass sich die gesamte Geräteserie außerhalb der Spezifikation befindet, was man dann nicht bemerkt. Am ehesten fällt auf, wenn jedes Gerät mit unterschiedlichem Koeffizienten in unterschiedliche Richtungen driftet.

Der einzige Weg, um eine definierte Genauigkeit zu erhalten und nachzuweisen, dass die Messgeräte im Spezifikations-Toleranzband liegen, ist, sie gegen eine bekannte und rückführbare Messgröße zu vergleichen. Dieses Herangehen wird „Kalibrierung“ genannt. Für viele Anwendungen genügt es, diesen Check durchzuführen und genau zu wissen, wie hoch die Abweichungen dieser Messanordnung sind. Eine offizielle Zertifizierung, für die die zu testenden Geräte in ein Kalibrationslabor gegeben werden müssen, ist bei einer großen Anzahl von Einsatzfeldern gar nicht nötig. Eine übliche und zuverlässige Praxis in diesen Fällen ist, mit sogenannten „Transferstandards“ zu arbeiten, die von einem Standardlabor zertifiziert sind, um die zu messenden Messgeräte im eigenen Labor zu qualifizieren. Mit ein wenig Mathematik lässt sich dann die zu erwartende Ungenauigkeit für das Messgerät errechnen.

## Warum sollte man all dieses tun?

Darauf gibt es eine einfache Antwort: Zeit-, Kostenersparnis und weniger Schwierigkeiten. Sind diese Ersparnisse das Geld wert, das die Einrichtung eines Transferstandard-Labors bei einem mittelständischen Betrieb rechtfertigt? Ja, bei Weitem!

Bereits im Studium wird gelernt, dass Messungengenauigkeiten und Messtoleranzen im Blickfeld des Ingenieurs sein müssen. Im besten Fall sind die Messungengenauigkeiten vernachlässigbar. Der Zeitdruck mit „Time to Market“ entbindet jedoch nicht davon, sich über die Messungengenauigkeiten ins Bild zu setzen. Denn wird ein in der Entwicklung befindliches Produkt oder eine Stichprobe aus der Produktion entnommen, das bei der Qualitätskontrolle durchfällt, führt dies unweigerlich zur Nachentwicklung und damit zu Zeitverzögerungen.

Und der härteste Qualitätskontrolleur ist der Kunde. Nicht auszudenken, wenn ein Fehler öffentlich wird und es vielleicht sogar zu Rückrufaktionen kommt. Jedem ist sofort klar, dass diese notwendigen Aktionen einer Gewinnvernichtung gleichkommen – abgesehen vom Image-Schaden. Mit einem perfektionierten Prozessablauf, der auch die Messgenauigkeit einschließt, wären derartige Fehler vermeidbar.

Ein weiterer Aspekt ist, die Präzision der eigenen Qualitätsmesszeuge zu verbessern. Das präzise 8½-stellige Multimeter 3458A von Keysight, das in vielen Standardlabors weltweit eingesetzt wird, kann beispielsweise auf einen Fehler kleiner 1 ppm geführt werden, wenn es täglich gegen einen Präzisionswiderstand kalibriert wird. Die meisten Keysight-Multimeter haben eine weitere Stelle in der Auflösung, die über den GPIB-Bus ausgelesen werden kann. Und wenn das Gerät gegen den Haus-Standard kalibriert ist, kann diese verdeckte Stelle sehr wohl genutzt werden.

## Grundsätzliche Überlegungen

Kalibration ist das Vergleichen eines Gerätes (DUT; Device Under Test) gegen eine sehr genau bekannte Referenz. Das erscheint simpel – ist es aber nicht. Voraussetzung ist, dass die Referenzen sehr genau und stabil sind und man ihren Fehler kennt.

Jede Referenz hat eine Voraussetzung: Sie muss den Wert liefern, den man von ihr kennt. Über einen Referenz-Widerstand mit einem Nominalwert von  $10\ \Omega$  soll bekannt sein, dass er in Wirklichkeit einen Widerstand von genau  $9,9999828\ \Omega$  hat. Dieser Wert ist der Referenzwert, wogegen das DUT gemessen wird. Hat man nun ein Multimeter mit einer Widerstandsmessfunktion mit entsprechender Auflösung und Genauigkeit, so erwartet man eine Anzeige mit genau diesem Zahlenwert. In Wirklichkeit wird es jedoch nicht diesen Wert anzeigen, was zwei Gründe haben kann:

- Es hat sich der Referenzwert geändert oder
- das Multimeter zeigt nicht den exakten Wert an.

Zum ersten Punkt: Es ist offensichtlich, dass sich auch die Referenz ändern kann. Wichtig ist und es muss darauf geachtet werden, dass Referenzen ihren Wert erhalten und man ihren Wert genau kennt. Ferner muss sichergestellt werden, dass die Referenz in regelmäßigen Intervallen überprüfungs- beziehungsweise kalibriert wird. Und hier ist nicht nur wichtig, dass der jeweilige Referenzwert bekannt ist, sondern dass auch die vorhergehenden Referenzwerte, also die Historie der Referenzwerte, dokumentiert sind. Von den Herstellern wird typischerweise ein einjähriger Kalibrationsrhythmus angegeben, wobei manche Referenzen sogar in einem 90-Tage-Intervall kalibriert werden müssen. Durch den Vergleich des aktuellen Referenzwertes zum vorhergehenden Referenzwert lässt sich die Alterung pro Intervall ermitteln und mit den Alterungen aus den Vorintervallen vergleichen. Mit dieser Information kann dann die Referenz deutlich genauer spezifiziert werden. Ein einfaches Beispiel soll dieses verdeutlichen:

Der oben genannte Widerstand soll seinen Wert um  $-0,0000072\ \Omega$  pro Jahr oder  $-7,2\ \text{ppm/Jahr}$  reduziert haben (Anmerkung: dieser Wert wäre sehr hoch für einen Referenz-Messwiderstand). Dann lässt sich nachrechnen, dass sich der Widerstandswert um ca.  $0,02\ \mu\Omega/\text{Tag}$  bzw.  $-0,02\ \text{ppm/Tag}$  verändert. Nach der letzten Kalibrierung muss dann nur noch die Anzahl der bereits verstrichenen Tage mit dieser Widerstandsänderung multipliziert werden und vom letzten Kalibrationswert subtrahiert werden, um einen genaueren aktuellen Referenzwert zu erhalten. Der Referenzwert lässt sich also tagesgenau errechnen.

Ein anderer Einflussfaktor ist die Umgebungstemperatur. Kalibrationslabore nutzen klimatisierte Räume. Die meisten Referenzwerte sind auf  $23\ ^\circ\text{C}$  spezifiziert. Kann die Temperaturstabilität für die Messdauer nicht eingehalten werden, so ist es wichtig zu wissen, wie hoch der Einfluss der Temperatur auf die Referenzgröße ist. Geschickt ist es natürlich, wenn die Temperatur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Referenz hat.

Zum zweiten Punkt: Das Multimeter kann  $10\ \Omega$  messen mit einer Genauigkeit von  $0,0036\ \%$  beziehungsweise  $36\ \text{ppm}$ . Vorausgesetzt, das Multimeter zeigt diese  $10,000000\ \Omega$  an, heißt das für den tatsächlichen Messwert, dass er im Bereich von  $9,99982\ \Omega$  bis  $10,00018\ \Omega$  liegen kann. Ist also der Referenzwiderstand exakt  $10\ \Omega$ , kann das Multimeter Werte in diesem Bereich anzeigen und dennoch ist das Multimeter in Spezifikation.

Wird nun das Multimeter gegen eine reale Referenz mit ebenso einer Unsicherheit gemessen, so müssen diese Unsicherheiten addiert werden, was dem schlechtesten Messwert entspricht (Worst Case). Entsprechend dem angeführten Beispiel hat das Multimeter eine Unsicherheit von  $36\ \text{ppm}$ , der Referenzwiderstand eine Unsicherheit von  $0,1\ \text{ppm}$ . Wenn also das Multimeter gegen diesen Referenzwiderstand gemessen wird, braucht man sich in diesem Fall keine Gedanken über den Referenzwert des Widerstandes zu machen. Um eine nutzbare Referenz zu haben, muss die Genauigkeit dieser Referenz um einige Faktoren besser sein als das DUT. Eine Daumenregel besagt, dass im Minimum

eine vierfach bessere Genauigkeit erforderlich ist. Hier gilt allerdings auch der empirische Grundsatz: Je mehr, desto besser.

# Die notwendigen Komponenten für einen DC-Kalibriermessplatz

Um eine Messanordnung aufzubauen, benötigt man eine stabile Spannungsquelle. Dies könnte auch eine Batterie sein, da diese kein Rauschen erzeugt. Jedoch ist eine hochgenaue Spannungsquelle die flexiblere Lösung. Die Anforderungen bezüglich Stabilität und geringem Rauschen als auch einem weiten Ausgangsspannungsbereich erfüllen die 4-Quadranten-Netzgeräte B2961A beziehungsweise B2962A von Keysight. Diese Netzgeräte haben einen Ausgangsspannungsbereich von  $-210\text{ V}$  bis  $+210\text{ V}$ , bei Ausgangsströmen von einigen nA bis hin zu 3 A. Diese Netzgeräte haben eine außergewöhnlich gute Kurzzeitstabilität und eine sehr gute Isolation des Ausgangs zur Masse. Um eine weitere Verbesserung zu erreichen, können diese Geräte mit einem Ultra-Low-Noise-Filter N1294A-021 (Filter für sehr geringes Rauschen) ausgerüstet werden, wodurch sich der Rauschanteil nochmals um den Faktor 10 reduziert. Diese Netzgeräte können auch als Stromquelle eingesetzt werden.

Die nächste Komponente, die für einen Messaufbau benötigt wird, ist ein Referenzwiderstand wie zum Beispiel der RS9010A von Wekomm. Dieser Referenzwiderstand ist äußerst robust und sehr genau. Der Widerstandswert kann auf 0,1 ppm produktionsseitig kalibriert werden und hat eine Stabilität von 1 ppm/Jahr; die Temperaturdrift liegt unter  $0,3\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  über einen weiten Temperaturbereich.

Zusätzlich zum Referenz-Widerstand benötigt man noch eine Spannungsreferenz und zu deren Verifikation ein Spannungsmessgerät. Das derzeit präziseste Spannungsmessgerät, das auch in vielen Standardlabors weltweit eingesetzt wird, ist das Keysight 3458A. Zusätzlich zu dieser Präzision zeichnet sich dieses Gerät auch durch die Stabilität aus, auch wenn es zwischen zwei Messungen ausgeschaltet oder/und transportiert wird. Die offiziellen Spezifikationen für dieses Gerät weisen eine maximale Drift von 8 ppm/Jahr aus. Kein anderes Gerät bietet bessere Werte. Sorgsam gewartete und kalibrierte Geräte dieses Typs erreichen sogar eine Drift unter 1 ppm/Jahr. Diese Werte machen das 3458A zu einem idealen Transferstandard für die oben aufgeführte Kalibrationsanwendung.

## Der Messvorgang

Die Messgeräte benötigen mindestens eine Stunde Aufwärmzeit in dem Raum, in dem die Messungen stattfinden. Ferner sollten die Geräte dann mindestens eine Stunde eingeschaltet sein, bevor mit einer Kalibrationsmessung begonnen wird. Die Wekomm-Widerstände sollten ebenfalls eine Stunde an dem Ort der Messung verweilen, bis sie zum Einsatz kommen. Das DMM 3458A benötigt ca. vier Stunden für ein Warm-up und für die Stabilisierung.

Wenn öfters derartige Referenzmessungen und Kalibrationen durchgeführt werden müssen, ist es von Vorteil, einen kompletten Messplatz einzurichten, wobei die verwendeten Messgeräte permanent eingeschaltet sind. Damit vermeidet man die langen Warm-up-Zeiten.

Zur Messung und Kalibrierung von Spannung benötigt man eine Referenz-Spannungsquelle. Die Referenzspannung sollte in dem Messbereich liegen, in dem auch die Spannung gemessen werden muss. Soll das DUT in allen Messbereichen getestet werden, muss auch die Referenzspannung nachgeführt

werden und jeweils mit dem 3458A gemessen werden. Man verbindet hierzu das Keysight 3458A mit dem Netzteil B2961A und stelle die Ausgangsspannung so ein, dass das 3458A genau die Spannung anzeigt, die später gemessen werden soll (**Bild 1**).

Danach darf das B2961 nicht mehr verändert werden und anstatt des 3458A wird das DUT angeschlossen. Vergleicht man beide Anzeigewerte, kann die Abweichung des DUT vom Referenzwert ausgemacht und für spätere Überprüfungen beziehungsweise Berechnungen dokumentiert werden. Um die Messung nochmals zu überprüfen, kann nun das 3458A nochmals angeschlossen werden – auch dieser Messwert sollte notiert werden. Die beiden Ablesungen des 3458A sollten nicht unterschiedlich sein und wenn, dann nur einen sehr kleinen Unterschied aufweisen. Der Durchschnitt dieser beiden 3458A-Messungen wird dann zur Berechnung der Abweichung des DUT herangezogen.

Die Widerstandskalibration ist deutlich einfacher. Es muss nur der Referenz-Widerstand an das DUT angeschlossen werden und eine Ablesung erfolgen (**Bild 2**). Wird der Wekomm-Widerstand als Referenz herangezogen, so kann die Ablesung am DUT direkt genutzt werden. Auch hier sollten die Messwerte festgehalten werden. Sollte die Messung mit einem 1- $\Omega$ -Widerstand durchgeführt werden, so ist darauf zu achten, dass eine 4-Draht-Messung erfolgt, um den Eigenwiderstands-Einfluss der Messkabel zu vermeiden. Verfügt das DUT nicht über die Möglichkeit einer 4-Draht-Messung, muss der Einfluss des Messkabels gesondert ausgemessen werden. Dazu verbinde man die beiden freien Enden der Messkabel und warte eine Einschwingzeit ab, um dann den Eigenwiderstand der Kabel am Messgerät abzulesen. Danach wird der Referenzwiderstand mit dem DUT gemessen und vom angezeigten Wert der Widerstand der Kabel subtrahiert.

Für eine Strommessung werden alle drei Messgeräte benötigt. Zunächst muss ein definierter Strom eingestellt werden. Der 1- $\Omega$ -Widerstand wird gleichzeitig als Shunt-Widerstand genutzt, jedoch nur, wenn der Referenzstrom eingestellt wird. Man verbinde die Strom-Eingänge des Widerstandes mit dem Netzgerät B2961A und schalte das Netzgerät auf konstanten Ausgangsstrom.

Dann verbinde man das 3458A mit den Abtast-Eingängen des Referenzwiderstandes; dabei muss das 3458A auf Spannungsmessung eingestellt sein. Nun sollte der Strom der Netzquelle so eingestellt werden, dass die Spannungsmessung dem gewünschten Strom entspricht (**Bild 3**).

Nachdem der Wert des Referenzwiderstandes bekannt ist, ist damit auch der Strom bestimmt, wenn das 3458A eine Spannung  $U=R_{\text{Ref}} I$  anzeigt. Damit ist sichergestellt, dass genau der Strom fließt, der durch die Gleichung bestimmt wird. Das Netzgerät sollte nun nicht mehr verändert werden, der Messwiderstand sollte abgeklemmt, das DUT dafür angeklemt werden.

Nachdem der Strom bestimmt ist und durch das DUT fließt, kann die Ablesung am DUT direkt mit dem eingestellten Strom verglichen werden.

Um den Widerstandsmessbereich des 3458A zu verifizieren, kann der Wekomm-Referenzwiderstand verwendet werden. Nach einer Aufwärmzeit sollten folgende Prozeduren am 3458A durchgeführt werden: „ACAL ALL“ oder „ACAL OHMS“. Dies stellt sicher, dass die Drift des Gerätes minimiert wird. Danach sollte dann der Wekomm-Widerstand am 3458A angeschlossen werden; von Vorteil ist, die Verbindung an der Rückseite des 3458A durchzuführen. Den Wert sollte man auch für spätere Vergleiche dokumentieren.



© Klaus Höing

*Bild 1: Messanordnung zur Bestimmung eines Referenzspannungswertes.*



© Klaus Höing

*Bild 2: Widerstandsmessung in 4-Leiter-Messanordnung mit dem Wekomm-Referenzwiderstand.*



© Klaus Höing

*Bild 3: Einstellen eines Referenzstroms mit einem 1- $\Omega$ -Shunt-Widerstand.*

Damit kennt man die Abweichung des 3458A. Schaltet man dann auf die frontseitigen Anschlüsse um, an denen der unbekannte Widerstand angeschlossen ist, so lässt sich der Widerstandswert ablesen und mit der zuvor festgestellten Abweichung verrechnen. Man erhält eine präzise Messung im Genauigkeitsbereich von 1 ppm bis 2 ppm.

---

## **Dipl.-Ing. Klaus Höing**

---

trat nach dem Studium der Elektrotechnik in Stuttgart 1980 bei Hewlett Packard (später Agilent, jetzt Keysight Technologies), Böblingen, in den Entwicklungsbereich für Messtechnik ein. 1998 wechselte er in den Bereich Computertechnik bei Hewlett Packard als PR-Manager für die deutsche Niederlassung. Seit dem Frühjahr 2012 ist er bei der Firma dataTec in Reutlingen mit PR-Aufgaben betraut.

---

1. Do it yourself
2. Warum sollte man all dieses tun?
3. Die notwendigen Komponenten für einen DC-Kalibriermessplatz

© 2016 WEKA FACHMEDIEN GmbH. Alle Rechte vorbehalten.