

## Messung von „unechten“ DC-Signalen

Für die Messung von DC-Signale könnte man annehmen, dass keine hochwertigen Leistungsmessgeräte einzusetzen sind, da Strom- und Spannungsmessgeräte für DC in nahezu beliebiger Genauigkeit preisgünstig zu bekommen sind und die Werte nur noch multipliziert werden müssen. Die praktische Schwierigkeit liegt darin, dass es kaum „echte“ DC-Signale gibt, da in sehr vielen praktischen Anwendungen Takte und Rippel vorkommen.

In der Leistungsmesstechnik kommen DC-Signale hauptsächlich in folgenden Applikationen vor:

- DC-DC-Konverter
- DC-Output von Netzteilen
- DC-Zwischenkreis bei Frequenzumrichtern
- DC-Eingang bei (Solar-Wechselrichter)

In allen Fällen treten mit konventionellen DC-Messgeräten die nachfolgend geschilderten Probleme auf.

### Bandbreite

Bei vielen der oben aufgeführten Applikationen ist zwar die Spannung relativ „glatt“, aber der Strom weist durch die interne Taktung einen starken Rippel auf oder ist sogar rechteckförmig.

Nun könnte man argumentieren, dass nur gleichfrequente Signalkomponenten eine Wirkleistung verursachen können (siehe ZES ZIMMER® Applikationsbericht 105, „Leistungsmessung und deren theoretischer Hintergrund“) und es daher ausreichen würde, wenn man nur den DC-Anteil des Stromes misst. In der Praxis jedoch hat eine Spannungsquelle einen komplexen Innenwiderstand (R und L). Speziell Solarzellen haben eine relativ große ohmsche Komponente und somit führt ein Stromrippel auch zu einem Rippel auf der Spannung. Mit diesen beiden gleichfrequenten Signalanteilen hat man alle Voraussetzungen, damit auch

bei der Taktfrequenz Wirkleistung umgesetzt werden kann.

Die in der Praxis vorkommenden Taktfrequenzen von mehreren 10kHz übersteigen die Bandbreite üblicher DC-Messgeräte um Größenordnungen. Hinzu kommt, dass man jetzt die Phasenbeziehung zwischen Strom und Spannung beachten muss, was bei zwei unabhängigen Geräten nicht möglich ist. Eine Multiplikation von Strom und Spannung berechnet daher nicht die Wirkleistung, sondern nur die Scheinleistung. In diesem Fall hilft nur der Einsatz hochwertiger Leistungsmessgeräte weiter. Eine Abschätzung dieser hochfrequenten Anteile kann man am sinnvollsten anhand eines praktischen Beispiels zeigen: Moderne Solarwechselrichter liegen mit ihrem Wirkungsgrad in Bereichen von 98% und mehr. Diese Werte lassen sich aber nur erreichen, wenn an einer extrem sauberen Spannung gemessen wird, die man nur mit sehr hochwertigen DC-Quellen erzeugen kann. Sobald die Spannung einen Rippel aufgeprägt bekommt, lassen sich diese Wirkungsgrade jedoch nicht mehr erzielen, da die MPP (Maximum Power Point) Regelung dann nicht mehr optimal arbeitet. Dadurch können die Wirkungsgrade um bis zu einem Prozent verringert werden. Diese Wirkungsgrade anschließend wieder um 1% zu erhöhen, stellt für die Hersteller dieser Wechselrichter eine Herausforderung dar.

1/5

### Messzeit

Je genauer eine Messung werden soll, desto länger muss gemessen werden. Sollen jedoch z.B. bei einem Frequenz-Umrichter hochdynamische Vorgänge wie ein Motoranlauf vermessen werden, kommt es auf kurze Messzeiten an. Moderne Leistungsmessgeräte sind in der Lage, alle 50ms Messwerte zu liefern, und das ohne irgendwelche Messlücken zwischen den einzelnen Messungen. Für übliche DC-Messgeräte können hingegen sowohl die kurze Messzeit als auch die Lückenlosigkeit ein Problem darstellen.

### Potentialtrennung

Bei der Strommessung am DC-Zwischenkreis in einem Frequenzumrichter haben in der Regel beide Leitungen eine erhebliche Spannung gegen Erde. Gerade bei DC-Strommessgeräte können hier zwei Probleme auftreten:

- Die Geräte müssen von ihrer Isolation so ausgelegt sein, dass diese Messung keine Gefahr für den Benutzer darstellt. Das sollte bei modernen Multimetern noch das kleinere Problem darstellen.
- Die Geräte könnten mit einem Gleichtaktsignal betrieben werden. Dabei ist eine gute Gleichtaktunterdrückung wichtig.

Beide Bedingungen werden von guten Leistungsmessgeräten erfüllt, da diese speziell für diesen Anwendungsfall entworfen sind: Die Messung in den Phasen eines per Frequenzumrichter gesteuerten Motors.

### Anzeigeumfang

Ein typischer Anwendungsfall, der meist als „DC-Messung“ bezeichnet wird, ist ein Stellmotor im Kfz, der über einen

pulsweiten modulierten Halbleiterschalter aus einer Batterie gespeist wird. Der Strom zum Motor besteht wegen der Motorinduktivität aus einer DC-Komponente mit überlagertem Rippelstrom. Der Strom in den Halbleiterschalter und die Spannung am Motor sind hingegen eine Überlagerung von Rechteckanteil und Gleichanteil. Hier können verschiedene Messgeräte, auch abhängig von der Einstellung, stark unterschiedliche Werte anzeigen. Welcher Wert der richtige ist, hängt davon ab, wozu man ihn braucht:

- Für die Batterieentladung: Gleichanteil (=DC-Wert)
- Für die Erwärmung des Halbleiterschalters: Effektivwert (mit Gleichanteil)
- Für einen Filterkondensator: Effektivwert (ohne Gleichanteil)

Multimeter zeigen je nach Einstellung oft nur den DC-Anteil oder den Effektivwert (ohne Gleichanteil) an. Den thermisch wirksamen gesamten Effektivwert (mit Gleichanteil) zeigen nur die wenigsten Multimeter an. Mit DC-Messgeräten kann man diese Größen zudem nur fehleranfällig nacheinander messen und anschließend den gesamten Effektivwert errechnen. Ein modernes Leistungsmessgerät von ZES ZIMMER® zeigt dagegen alle Werte gleichzeitig an.

### Signalverarbeitung

Eine Art Grundgesetz bei der Verarbeitung von Signalen ist, dass die DC-Eigenschaften von Verstärkern umso schlechter werden, je größer deren Bandbreite wird. Da heutzutage Bandbreiten von mehreren Megahertz zum Stand der Technik gehören, sollen hier ein

paar Arbeitsprinzipien erläutert werden, wie moderne Geräte versuchen, die Messgenauigkeit auch bei DC trotzdem hoch zu halten.

Reine DC-Messgeräte können mehrere Dinge zu ihrem Vorteil nutzen. Erstens kann man durch geeignete Filter nahezu alle Störgrößen eliminieren. Dem Rauschen kann man mit langen Messzeiten begegnen, die ja bei „echten“ DC-Messungen nicht stören: Das Signal ist ja konstant, sonst wäre es kein DC! Weiterhin kann man für DC optimierte Operationsverstärker mit geringer Bandbreite einsetzen. Und schließlich hat man noch die Möglichkeit, das Messsignal intern abzutrennen, den durch den Messkanal erzeugten DC zu messen und aus dem Ergebnis herauszurechnen. Diese Messlücken spielen bei „echten“ DC-Signalen, wie eben schon gezeigt, keine Rolle.

Bei Leistungsmessgeräten sind die meisten dieser Punkte applikationsbedingt anders realisiert:

- Die Bandbreite muss groß sein und man darf diese hochfrequenten Anteile eben nicht abtrennen
- Für DC optimierte Operationsverstärker fallen somit aus
- Für dynamische Vorgänge muss die Messzeit kurz sein, damit die Vorgänge zeitlich fein aufgelöst werden und nicht in einem Mittelwert untergehen

Lediglich bei den Messlücken gibt es Spielraum für technische Detaillösungen, die jedoch große Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können:

Jeder Operationsverstärker verursacht einen DC-Offset, welcher als Teil des Messwertes interpretiert wird. Das Messgerät muss diesen DC-Offset

kompensieren. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

Die erste ist, dass man künstlich Lücken in der Messung erzeugt, während denen das Messsignal intern von der Signalaufbereitung getrennt und der DC-Offset bestimmt wird. Mit diesem werden dann die Messwerte intern korrigiert. Dieses Verfahren kommt häufig bei einfachen Geräten zur Anwendung. Solange diese Messlücken periodisch auftreten, kann eine solche Lösung noch akzeptabel sein, es sei denn, man verpasst dadurch transiente Messwerte. Einige Geräte führen diesen Nullpunktabgleich aber nur bei einer Messbereichsumschaltung durch. Das klingt zunächst äußerst geschickt, da zu diesem Zeitpunkt ohnehin eine Messlücke entsteht. Der Nachteil ist aber, dass die Spezifikation des Herstellers nur relativ kurz nach einer Messbereichsumschaltung überhaupt gültig ist. Schaltet man also morgens sein Gerät ein und wechselt, am besten noch bei kaltem Gerät, in einen bestimmten Bereich, so wird der DC zunächst sauber abgeglichen. Wenige Minuten später jedoch, wenn sich das Gerät erwärmt hat, ist dieser Abgleichwert schon nicht mehr richtig. Misst man in diesem Bereich ohne Wechsel weiter, kommen dann noch die Effekte preiswerter Komponenten hinzu (große Drift, große Temperaturabhängigkeit, ...). Kurz gesagt, diese Art der Messung kann vorteilhaft sein, kann sich aber auch komplett ins Gegenteil entwickeln. Das Hinterhältige daran: Dieser Messfehler kann bei einer Kalibrierung systembedingt nicht bemerkt werden (obwohl er natürlich vorhanden ist), da dort immer ein Messbereich eingestellt und kurz darauf vermessen wird. Innerhalb der kurzen Zeit zwischen Abgleich und Messung glänzt das System

mit Werten, die in der Praxis völlig unrealistisch sind.

Ein weiterer Nachteil der DC-Kompensation im Betrieb ist, dass man nicht alle DC-Quellen im Gerät erfassen kann: Treten z.B. an den Anschlussklemmen Thermospannungen auf und das Signal wird erst dahinter abgeklemmt (was nicht anders Möglich ist, da man nicht den Strom des Kunden unterbrechen darf!), so werden diese nicht mit gemessen, ebenso wenig mögliche DC-Fehler durch die Abklemm-Schaltung selbst.

Einfache Messgeräte müssen also irgendwann Lücken einfügen, um die Effekte der kostengünstigen Bauteile wieder kompensieren zu können.

Die zweite und bessere Möglichkeit ist, den DC-Offset dauerhaft durch Justierung des Gerätes zu kompensieren. Dies erfordert die Verwendung hochwertiger Komponenten mit geringer Drift. Nur so können Justierungsintervalle gewährleistet werden, die mindestens so lang sind, wie die vom Hersteller empfohlenen Kalibrierintervalle. Dieses Feature bieten jedoch nur Geräte im High-End-Bereich.

Die Messgeräte von ZES ZIMMER® arbeiten prinzipiell lückenlos, bedingt durch die Verwendung hochwertiger Bauteile. Die Messunsicherheiten liegen im Bereich von Geräten, die sich im Betrieb (hoffentlich) abgleichen und das, obwohl unsere Spezifikation für 1 Jahr garantiert wird: Sollte ein Gerät innerhalb eines Jahres nach einer Justierung die Spezifikation nicht einhalten, würde ein Garantiefall vorliegen.

### **Tunen der Messgeräte über die Herstellerspezifikation hinaus**

Bei einigen sehr speziellen Messaufgaben kann es notwendig sein, das letzte aus einem Messgerät heraus zu hohlen. Ein

Beispiel wäre die Messung des Wirkungsgrades eines Solarwechselrichters, bei der auch noch der letzte Hauch Unsicherheit beseitigt werden müsste. Hier kann es sinnvoll sein, die Messgeräte trotz der ohnehin schon geringen Unsicherheit optimal abzugleichen, obwohl sie noch weit innerhalb der Hersteller-Spezifikation liegen! Das ist bei DC-Signalen natürlich besonders einfach, da man nur die offenen Spannungseingänge kurzschließen muss, um zu sehen, wie groß der DC-Fehler der Kanäle ist. Der Kurzschluss ist hier also die Referenz, man braucht keine teuren Normale. In diesem Fall werden längerfristige Effekte wie Drift eliminiert und es bleiben nur noch die Kurzzeitfehler übrig.

ZES ZIMMER® bietet für diese speziellen Fälle zwei Verfahren an:

Zum einen kann man per Bedienmenü die Nullpunkte des Gerätes nach dem Warmlaufen temporär neu schreiben. Diese neuen Nullpunkte bleiben nur bis zum Ausschalten des Gerätes gespeichert, die Werkseinstellungen, welche die Einhaltung der Spezifikation garantieren, werden dabei nicht angetastet und stehen beim nächsten Start wieder zur Verfügung. Dieser Abgleich kann natürlich erst bei warmem Gerät durchgeführt werden und bedingt, dass alle Messsignale vom Gerät getrennt werden.

Er bietet aber in der Regel die optimale Reduzierung der Unsicherheiten, da er bei jedem Einschalten (oder auch vor jeder Messung) wiederholt werden muss/kann.

Zum anderen können Kunden mit einer speziellen Abgleichsoftware die Werkseinstellungen der Nullpunktwerte überschreiben. Führt ein Kunde einen solchen Abgleich fehlerhaft durch (z.B. mit angelegten Signalen statt mit kurz-

geschlossenen Eingängen) so wird das Gerät natürlich dauerhaft falsch messen. In diesem Fall kann ZES ZIMMER® keine Garantie mehr für die Einhaltung der Spezifikation übernehmen. Dieses Verfahren bietet sich an, wenn nicht die letzte Reserve aus dem Gerät heraus geholt werden muss oder wenn es zu umständlich ist, das Gerät nach jedem Einschalten neu zu justieren.

### Fazit

Bei der Messung von DC-Anteilen in Signalen stehen verschiedene Messgeräte zur Verfügung. Es konnte klar gezeigt werden, warum konventionelle DC-Messgeräte bei Leistungsmessungen Probleme bereiten können.

Aber auch bei speziellen Leistungsmessgeräten muss man die Spreu vom Weizen trennen: Bei den Angaben zur DC-Unsicherheit reicht es nicht nur nach den reinen Zahlenwerten zu schauen, sondern die Randbedingungen sind fast noch wichtiger:

- Ein guter Zahlenwert der sich unter der Annahme nicht realistischer Bedingungen ergibt, kann mit einem großen Fehler in der Praxis verbunden sein, wenn die Signalverarbeitung ungeschickt gelöst ist.
- Ein Gerät, welches die Spezifikation ohne Einschränkungen einhält, wird in der Praxis oft die geringere Messunsicherheit aufweisen.

### Verfasser

Dipl.-Ing. Thomas Jäckle  
Entwicklung und Applikation