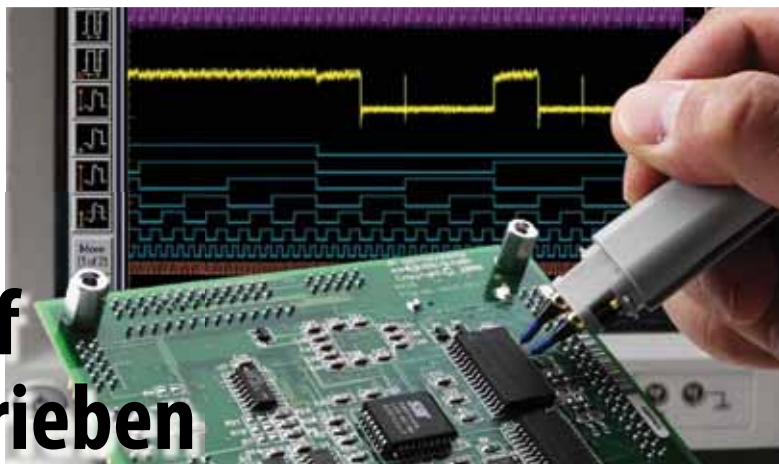


LABORMESSTECHNIK

Präzision von Tastköpfen auf die Spitze getrieben



Tastköpfe spielen eine entscheidende Rolle bei Messungen mit Oszilloskopen im Labor und „vor Ort“. Ihre elektrischen Eigenschaften beeinflussen ganz wesentlich die Genauigkeit und auch die Reproduzierbarkeit von Analyse-Aufgaben. Hier einige Tipps aus der Praxis für die bewährte AC-Kalibrierung.

Von Mike McTigue und Jürgen Stemler

Wie die Oszilloskope, denen sie die Signale zuliefern, haben auch die Tastköpfe eine lange und erfolgreiche Entwicklungsgeschichte. Getrieben von dem Verlangen nach höherer Bandbreite und Genauigkeit, wurden ihre von der internen Hardware vorgegebenen Eigenschaften immer präziser korrigiert und verbessert. Das

optimale zur Zeit verfügbare Justierverfahren ist die AC-Kalibrierung des Tastkopfes in der Umgebung, in der später die Messung selbst erfolgt. Sie treibt nicht nur die Genauigkeit auf die Spitze, sondern kann – als erfreulicher Nebeneffekt – auch die Nutzbandbreite des Tastkopfes weit über seine nominelle Bandbreite hinaus vergrößern.

Wie stellt man maximale Genauigkeit sicher?

Noch vor wenigen Jahren vertrauten die Anwender von Hochleistungs-Oszilloskopen ganz auf die interne Hardware ihrer Tastköpfe. Deren Bandbreite und Genauigkeit war völlig ausreichend für das damals übliche Leistungs-niveau. An die jüngeren Tastkopf-Generationen wurden jedoch bald zwei Forderungen gestellt: größere Bandbreite und höhere Genauigkeit. Größere Bandbreite ganz einfach deshalb, weil die zu untersuchenden Systeme immer schneller getaktet wurden; höhere Genauigkeit, um – im Hinblick auf die Messunsicherheiten – mit weniger engen Spezifikations-toleranzen auszukommen.

Aufgrund dieser Anforderungen begann man mit der Messung der Sprungantwort von Tastkopfsystemen sowie deren Korrektur und Verbesserung mit Hilfe der Digitalen Signalverarbeitung. Ursprünglich waren die Daten, die das Tastkopfsystem repräsentierten, eine normierte oder gemittelte Sprungantwort der Tastkopf-Komponenten. Das verbesserte durchaus die durchschnittliche Genauigkeit. Aufgrund der Unterschiede zwischen den Nominalwerten und den Eigenschaften eines spezifischen Tastkopfes konnten die Ergebnisse jedoch immer noch variieren.

Zur weiteren Reduzierung dieser Varianzen lieferten die Hersteller Parameter zur Korrektur der für die Streuung verantwortlichen Tastkopf-Komponenten. Sie wurden in Speichern auf der Platine selbst abgelegt oder in Datenbanken zusammen mit den korrespondierenden Seriennummern gespeichert. Das war ein weiterer Schritt in Richtung höherer Tastkopfgenauigkeit, konnte jedoch andere Einflussgrößen – beispielsweise Veränderungen der Systemantwort mit der Zeit, Abstand der Prüfspitzen, Anordnung der Verbin-



Bild 1. Sprungantwort eines 6-GHz-Differenzialtastkopfs im Zeit- und Frequenzbereich unter Verwendung nomineller Korrekturfaktoren. Die hier gezeigten Spektren entstehen durch Differenzieren der Sprungfunktionen, um die Impulsantworten zu erhalten, und eine anschließende schnelle Fouriertransformation der Impulsantworten, um den Frequenzgang zu errechnen. Erläuterungen: Die rote Rampe (1) liegt am Eingang des Tastkopfs, die gelbe Rampe (2) ist am Ausgang des Tastkopfs anliegend. Das rote Spektrum (3) ist am Eingang des Tastkopfs zu erfassen (alle Spektren haben vertikal 3 dB/Teilung, horizontal 2 GHz/Teilung), das gelbe Spektrum (4) ist am Ausgang des Tastkopfes festzustellen.

dungskabel, Beschädigungen, Abnutzung und Verschleiß sowie die räumliche Lage des Tastkopfes zum Prüfling – nicht mit einbeziehen.

Das ideale Verfahren, um die maximale Genauigkeit des Tastkopfes sicherzustellen, ist eine Kalibrierung in genau der Konfiguration, in der die Messung selbst durchgeführt wird. Vor kritischen Messungen werden so auch Parameter wie etwa der Abstand der Prüfspitzen und die räumliche Lage des Tastkopfes zum Prüfling berücksichtigt. Das wird üblicherweise für DC-Verstärkung und Offset, nicht aber für den Frequenzgang ("AC-Response") durchgeführt.

AC-Kalibrierung als Lösung

Vor kurzem hat Agilent Technologies (www.agilent.com) für die Hochleistungs-Echtzeit-Oszilloskope der Infiniium-Serie eine Möglichkeit zur AC-Kalibrierung geschaffen. Sie nutzt die Software-Applikation „N2809A Precision Probe“, die Oszilloskop-interne schnelle Kalibrierungsroutine sowie eine spezielle Tastkopfaufnahme, um jeden individuellen Tastkopf genau ver-



Bild 3. Zeit- und Frequenzantwort eines 6-GHz-Tastkopfs, auskorrigiert bis 12 GHz.

messen und seine Sprungantwort korrigieren zu können.

Als Beispiel für die Effektivität dieses Leistungsmerkmals soll hier der 6-GHz-Differenzial-Tastkopf E2675A aus der Infiniium I-Produktfamilie zusammen mit dem 12-GHz-Tastkopfverstärker Infiniium II 1169A untersucht werden.

Bild 1 zeigt die Antwort auf eine Sprungfunktion unter Einsatz der nominalen Korrekturfaktoren. Die Sprungantwort wird vom Oszilloskop per Tiefpass auf 6 GHz gefiltert; das ist in etwa die Sprungantwort der Hardware. Oberhalb dieser Frequenz beeinflusst die Geometrie des Tastkopfes die Sprungantwort ganz erheblich. Bemerkenswert in Bild 1 ist:

- Die vom Tastkopf „gemeldete“ Übergangszeit ist wesentlich länger als die des Eingangssignals.
- Das vom Tastkopf gelieferte Frequenzspektrum folgt dem Spektrum des Eingangssignals mit etwas Abweichung.



Bild 2. Ergebnisse der Tastkopf-Kalibrierung. Gelb (1) ist die am Eingang des Tastkopfes gemessene Spannung U_{in} ; sie wird größtenteils von orange überdeckt. Das zeigt, wie die Tastkopflast eine 50-Ω-Übertragungsleitung – das sind 25 Ω Quellimpedanz – beeinflusst. – Grün (2) ist die gemessene Ausgangsspannung U_{out} des Tastkopfes. – Zyan (3) ist die gemessene U_{out}/U_{in} -Übertragungsfunktion des Tastkopfes (grün dividiert durch gelb). – Orange (4) ist die korrigierte Ausgangsspannung des Tastkopfes. Sie wird die gemessene Eingangsspannung des Tastkopfes überdecken, wenn die U_{out}/U_{in} -Übertragungsfunktion einen linearen Frequenzgang bis hin zur durch Korrektur erreichbaren Grenzfrequenz aufweist. – Purpur (5) ist die korrigierte U_{out}/U_{in} -Übertragungsfunktion: Exakt so flach, wie sie sein soll.



Bild 4. Die während der AC-Kalibrierung mit Precision Probe gemessene Eingangsimpedanz des Tastkopfs.



Bild 5. U_{out} (rot) und U_{in} (gelb) mit $U_{\text{out}}/U_{\text{in}}$ -Kalibrierung.



Bild 6. U_{out} (rot) und U_{in} (gelb) mit $U_{\text{out}}/U_{\text{in}}$ -Kalibrierung auf der Basis einer in die Prüfspitze wirkenden Impedanz von 25Ω .

→ Die Bandbreite des Tastkopfs ist nicht das Tastkopfspektrum (gelb, Ziffer 4) über der vertikalen Skala des Schirms, sondern eher das Tastkopfspektrum über dem Eingangsspektrum (rot, Ziffer 3). Deshalb ist bei 6 GHz (drei Gitterteilungen vom linken Rand des Schirms) das Tastkopfspektrum etwas weniger als eine Gitterteilung (entsprechend 3 dB) vom Eingangsspektrum entfernt, das heißt die Bandbreite beträgt mindestens 6 GHz.

Mit Hilfe der Precision-Probe-Applikation lässt sich nun eine AC-Kalibrierung durchführen. Die Software liefert die in Bild 2 gezeigte grafische Darstellung der Kalibrierungsergebnisse. Bemerkenswert an dem Tastkopf und ein gutes Beispiel für diese Diskussion ist, dass er bis zu rund 12 GHz keinerlei Anzeichen eines Abregelns zeigt, obwohl die Bandbreite seiner internen Hardware nur bei etwa 6 GHz liegt. Das heißt, seine Bandbreite kann auf bis zu rund 12 GHz getrieben werden, ohne das Rauschen exzessiv zu steigern. Bild 3 zeigt die Ergebnisse der AC-Kalibrierung dieses Tastkopfs. Wichtig ist: Die vom Tastkopf gelieferte Übergangszeit liegt sehr viel enger an der Übergangszeit der Eingangsspannungs-Sprungfunktion, und der Kurvenzug des Tastkopfausgangs entspricht sehr gut dem des Eingangs. Und: Das Frequenzspektrum des Tastkopfes folgt dem des Eingangs bis nahezu 12 GHz sehr gut. Die Precision-Probe-Software liefert aber noch ein anderes sehr nützliches Ergebnis: Eine Grafik der gemessenen Eingangsimpedanz des Tastkopfs sowie einstellbare Messhilfslinien zur Ermittlung der kapazitiven und induktiven Last, gezeigt in Bild 4.

Standardmäßig kalibriert Precision Probe die $U_{\text{out}}/U_{\text{in}}$ -Übertragungsfunktion wie vorhin beschrieben. Das heißt, der Tastkopf zeigt dem Anwender, was an der Prüfspitze bei Belastung mit der Eingangsimpedanz des Tastkopfes anliegt. In vielen Fällen ist dies genau das, was der Anwender sehen will. Gelegentlich interessiert ihn jedoch auch, welche Signalform am Prüfpunkt vorhanden war, bevor der Tastkopf angelegt wurde. Es gilt also die Belastung durch den Tastkopf herauszunehmen, um die $U_{\text{out}}/U_{\text{source}}$ -Übertragungsfunktion zu erhalten. Das ist nur möglich, wenn man die Impedanz kennt, die in die Prüfspitze wirkt. Falls es sinnvoll ist, diese Impedanz durch einen einzelnen

LABORMESSTECHNIK

realen Widerstand – etwa 25Ω für eine ideale Quelle in einem mit Lastwiderständen abgeschlossenen $50\text{-}\Omega$ -System – anzunähern, kann man diesen Widerstand in Precision Probe eingeben, und die Software kalibriert die $U_{\text{out}}/U_{\text{source}}$ -Übertragungsfunktion auf Basis dieser Näherung. Es ist jedoch wichtig zu bedenken, dass die über die Prüfspitze in den Prüfling wirkende Impedanz nur sehr selten ein einzelner realer Widerstand, sondern typischerweise eine komplexe Impedanz mit Reflexionen und Resonanzen ist.

Bild 5 zeigt U_{source} und U_{out} für eine $U_{\text{out}}/U_{\text{in}}$ -Kalibrierung und demonstriert den Einfluss der Belastung durch den Tastkopf. **Bild 6** zeigt U_{source} und U_{out} für eine $U_{\text{out}}/U_{\text{source}}$ -Kalibrierung. Da die Tastkopfaufnahme, die Sprungsignalquelle und die Oszilloskopkanäle durchwegs hochwertige $50\text{-}\Omega$ -Komponenten sind, ist es in diesem Fall zulässig, eine in die Prüfspitze wirkende Impedanz von 25Ω anzunehmen. Dank der $U_{\text{out}}/U_{\text{source}}$ -Kalibrierung folgt U_{out} sehr schön U_{source} .

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die AC-Kalibrierung eines spezifischen Tastkopfs in der Konfiguration, die auch zur Messung benutzt wird, liefert eine stark verbesserte Genauigkeit.
- Eine AC-Kalibrierung kann Informationen über die Sprungantwort und die Eingangsimpedanz eines Tastkopfes liefern.
- Zeigt der Tastkopf einen wesentlichen Signalgehalt oberhalb seiner nominellen Bandbreite, kann eine AC-Kalibrierung die Nutzbandbreite vergrößern und zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten erschließen.
- Die AC-Kalibrierung kann die Belastung durch den Tastkopf am Prüfpunkt herausrechnen, wenn die dort wirkende Impedanz bekannt ist. Die Genauigkeit der Abschätzung dieser Impedanz bestimmt die Genauigkeit der so erhaltenen Sprungantwort. *ha*

Jürgen Stemler

ist bei Agilent Technologies in Deutschland Market Development Manager EMEA für die High-Speed-Digitalmesstechnik.

Mike McTigue

ist bei Agilent Technologies in den USA „Expert Hardware R&D Engineer“ – Lead Engineer/Architect für alle technischen Fragen, die mit Hochleistungs-Oszilloskop-Tastköpfen zusammenhängen.

elektroniknet.de