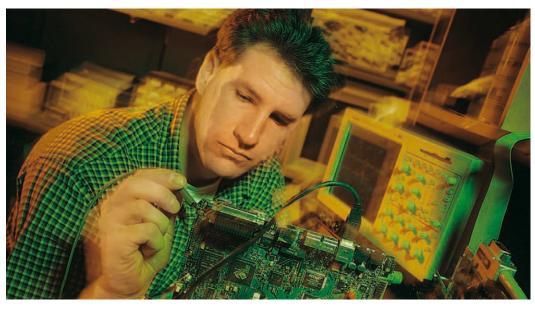
Grundlagen und Praxis der Signalintegrität, Teil 2:

### Messgeräte – Anforderungen und Anwendung

Da Signale im
Gigabitbereich in
digitalen Systemen
immer geläufiger
werden, wird auch das
Thema Signalintegrität
zu einem zentralen
Faktor, der unbedingt
zu berücksichtigen ist.
Hier helfen besonders
Logikanalysatoren und
Digitaloszilloskope,
Probleme zu lösen.



Logikanalysatoren verfügen über leistungsstarke Funktionen zum Triggern, Speichern und zur Darstellung von Digitalsignalen in vielen Formaten. Über Tastköpfe werden die Daten in mehrere Kanäle eingespeist. Die leistungsstarken, modernen Logikanalysatoren sind in der Lage, gleichzeitig Daten von Tausenden von Testpunkten zu erfassen. Durch Oszilloskop-Integration in die Lösungsoptimierung erhält man eine zeitkorrelierte Anzeige der erfassten Kurvenformen auf dem Bildschirm des Logikanalysators und Augendiagramme mit mehreren Kanälen. Tastköpfe ermöglichen gleichzeitige Timing-, State- und Analogerfassung etwa bei einer Timing-Auflösung von 125 ps (Taktrate 8 GHz), einer State-Erfassungsrate von bis zu 800 MHz und einer Aufzeichnungslänge von bis zu 256 Mb. Die Triggerung kann auf Flanke, Glitch, Logik, Setup/Hold usw. erfolgen. Weiter helfen Software-Analysepakete etwa bei der Prozessorunterstützung.

### Erkennen von digitalen Fehlern mit Logikanalysatoren

Der Logikanalysator ist vor allem bei komplexen Systemen mit zahlreichen Bussen, Eingängen und Ausgängen bei der Behebung digitaler Fehler das Gerät erster Wahl. Mit seiner hohen Kanalzahl und Speichertiefe sowie den hochentwickelten Triggerfunktionen verfügt er über genau die Funktionen, die zur Erfassung von digitalen Informationen an vielen Testpunkten und deren anschließender kohärenter Darstellung erforderlich sind.

Da es sich um ein echtes digitales Instrument handelt, erkennt der Logikanalysator Schwellenwert-Überschreitungen der überwachten Signale und zeigt diese logischen Signale so an, wie sie verarbeitet werden. Die daraus resultierenden Timing-Signale sind verständlich und lassen sich problemlos mit den erwarteten Daten vergleichen, um zu bestätigen, dass alles richtig funktioniert. Diese Timing-Signale sind

in der Regel der Ausgangspunkt bei der Suche nach Signalintegritätsproblemen. Bei den aktuellen, teils extrem hohen Datenraten eignet sich allerdings nicht jeder Logikanalysator. In der Einleitung sind einige Spezifikationsrichtlinien aufgeführt, die man bei der Auswahl eines Typs zur Behebung von komplexen Signalintegritätsfehlern berücksichtigen sollte.

Bei den mittlerweile extrem hohen Signalerfassungsraten und Speicherkapazitäten gerät die Bedeutung der Triggerfunktion leicht in den Hintergrund. Dabei stellen Trigger meist den schnellsten Weg zur Aufspürung eines Problems dar. Wenn ein Logikanalysator bei einem Fehler triggert, ist das der Beweis dafür, dass dieser Fehler tatsächlich aufgetreten ist. Die meisten modernen Logikanalysatoren verfügen über Trig-

Digitalgerät	Übergangszeit (Anstiegs- und Abfallzeit)
DDR-RAM	<250 ps
FireWire IEEE 1394b	80 bis 300 ps
Infiniband	≈100 ps
USB 2.0	>500 ps

Tabelle 1: Anforderungen an das Oszilloskop

Quelle: Grundlagen der Signalintegrität, Tektronix, www.tektronix.com, gekürzt ger, mit denen sich bestimmte Ereignisse erkennen lassen, die die Signalintegrität beeinträchtigen – z.B. Glitches und Verletzungen der Setup- und Hold-Zeit. Diese Triggerbedingungen können gleichzeitig auf hunderte von Kanälen angewandt werden – ein einmaliger Vorteil moderner Logikanalysatoren.

#### Tastkopflösungen für Logikanalysatoren

Das Tastkopfsystem des Logikanalysators spielt eine entscheidende Rolle. Über den Tastkopf muss das Signal mit der höchstmöglichen Signaltreue an den Logikanalysator geleitet werden. Die meisten Logikanalysatoren erfüllen diese grundsätzliche Anforderung. Doch bei einigen Typen sind separate Tastkopfanschlüsse für die Timing- und State-Erfassungen erforderlich. Diese Technik namens "Double Probing" kann die Signalumgebung beeinflussen, was sich negativ auf die eigentlichen Messungen auswirkt. Werden beispielsweise zwei Tastköpfe gleichzeitig an den Prüfpunkt angeschlossen, kann es zu unangemessen hoher Signalbelastung kommen; schließt man sie dagegen nacheinander an, besteht gleich zweimal die Gefahr, dass der Prüfpunkt beschädigt wird oder die Tastköpfe falsch angeschlossen werden.

Die Tastköpfe eines Logikanalysators können mit speziellen Steckern an das zu überprüfende System angeschlossen werden. Ein Beispiel ist der kompakte Mictor-Stecker, ein Spezialanschluss mit hoher Kontaktdichte,

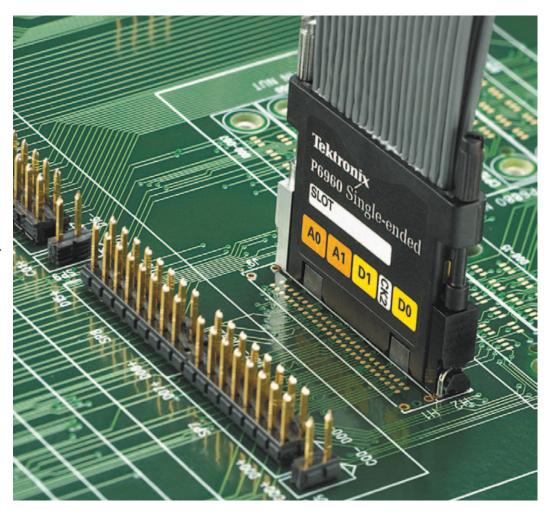


Bild 4: Steckerlos an die Leiterplatte angeschlossener D-Max-Tastkopf

der über einen entsprechenden Tastkopf mit dem Logikanalysator verbunden wird. Auf der Leiterplatte angebrachte Stecker sorgen für schnelle, sichere Verbindungen, erhöhen jedoch die Entwicklungskosten und können sich auf die Hochgeschwindigkeitssignale auswirken.

Als Alternative zu den konventionellen Mictor-Tastkopfsteckern wurden High-Density-Kompressionstastköpfe entwickelt. Zu ihrem Anschluss an den Prüfling sind keinerlei Stecker mehr notwendig. Statt dessen werden sie direkt an die "Land-Pads" auf der Platine angeschlossen. Bild 4 zeigt einen auf die Platine gesetzten HD-Kompressionstastkopf. Diese Tastköpfe werden über Gewindehülsen mit Innengewinde fixiert und lösen

damit das Problem der Leitungsinduktivität. Außerdem bieten sie eine sehr geringe kapazitive Belastung – nur 0,7 pF. Weiterhin ermöglichen sie sowohl "Single-Ended-" als auch differentielle Messungen ohne jeglichen Abstrich bei der Anzahl der Kanäle.

Einige Logikanalysatoren sind in der Lage, gleichzeitig Timing-

Logikanalysatorfunktion	Empfohlene Fähigkeiten zur SI-Analyse
Oszilloskop-Integration	Zeitkorrelierte Anzeige der mit dem Oszilloskop erfassten Kurvenformen auf dem Bildschirm
	des Logikanalysators, Augendiagramme mit mehreren Kanälen
Tastköpfe	Gleichzeitige Timing-, State- und Analogerfassung mit dem selben Logikanalysator-Tastkopf
Timing-Auflösung	125 ps (bei einer Taktrate von 8 GHz)
State-Erfassungsrate	Bis zu 800 MHz
Aufzeichnungslänge	Bis zu 256 Mb
Triggerung	Flanke, Glitch, Logik, Setup/Hold usw.
Analyse	Pakete zur Prozessorunterstützung und Disassembler
Anzeige	Mehrfache Anzeigen

Tabelle 2. Für die Analyse der Signalintegrität muss ein Logikanalysator so leistungsfähig wie möglich sein.

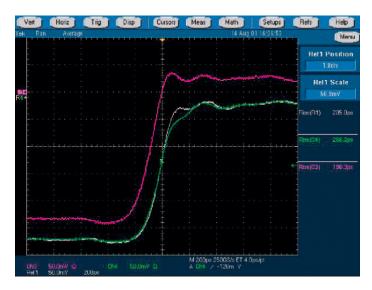


Bild 5: Zum Einfluss der Tastkopflast auf ein Hochgeschwindigkeitssignal

und State-Erfassungen über denselben Tastkopf durchzuführen. Das beschleunigt die Fehlerbehebung und die Analyse der Signalintegrität, indem der Einfluss der Tastköpfe auf den Prüfling auf ein Minimum reduziert wird.

Mittlerweile hat die Tastkopftechnologie eine neue Dimension erreicht. Die neuste Generation ist in der Lage, digitale (Timingund State-) Informationen an den Logikanalysator und dieselben Signale in analoger Form an ein Oszilloskop zu übertragen. Mit einem einzigen Tastkopf lässt sich somit jeder einzelne Aspekt des Signals untersuchen.

Bei komplexen digitalen Systemen werden oft dedizierte Testpunkte zur Messung von Signalen integriert. Einige dieser Testpunkte sind mit Stiften versehen, um den Anschluss an Clip-on-Tastköpfe und Leadsets zu vereinfachen. Diese Anschlüsse wirken sich oft auch dann bereits auf die Signale des Zielsystems aus, wenn es nicht an einen Logikanalysator angeschlossen ist.

Die Lage der Anschlusspunkte kann das Erscheinungsbild des Signals beeinflussen. Es empfiehlt sich daher, die Testpunkte möglichst nahe an die Signalempfänger zu setzen – dort weisen die Signale die Charakteristika auf, die von den logischen Schaltungen "gesehen" werden.

### Identifizierung von Verzerrungen mit Digitaloszilloskopen

Zweitwichtig zur Messung und Analyse der Signalintegrität ist das Digitaloszilloskop. Dies ist das Instrument zum Aufspüren von analogen Problemen, nachdem sie in digitaler Form mithilfe des Logikanalysators entdeckt wurden. Man unterscheidet das Digitalspeicher-Oszilloskop (DSO), das Digital-Phosphor-Oszilloskop (DPO) und das Sampling-Oszilloskop.

Zu den wichtigsten Eigenschaften eines DSOs oder DPOs zählt die Fähigkeit, einmalige Ereignisse erfassen zu können. Das DSO bzw. DPO erfasst die analogen Charakteristika des Signals. Es ist in der Lage, ein Rechtecksignal mit der gleichen Präzision zu erfassen wie eine transiente Spannungsspitze oder ein reines Sinussignal. Es kann auf das angezeigte Signal oder auf ein synchrones Signal triggern oder auch auf einen Befehl vom Logikanalysator warten.

Bei vielen Digitaloszilloskopen teilt sich die angegebene Abtastrate auf die Kanäle auf, viertelt sich also, wenn vier Kanäle belegt sind. Das kann sich negativ auf die Erfassungsqualität auswirken. Bei ver-

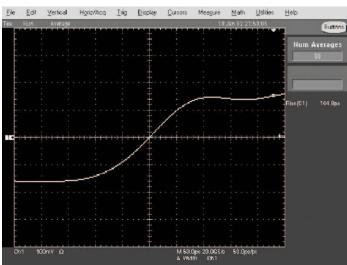


Bild 6: Darstellung einer Flanke mit einer tatsächlichen Anstiegszeit von 85 ps auf einem 4-GHz-DPO

ringerten Abtastraten werden weniger Samples pro Messzyklus erfasst, wodurch sich das Signal nicht mehr so präzise rekonstruieren lässt. Auch wenn die Bandbreite des Oszilloskops unverändert bleibt, leidet die Erfassungsgüte unter niedrigeren Abtastraten. Bei der Analyse der Signalintegrität ist das natürlich kontraproduktiv. Tabelle 1 nennt die wichtigsten Digitaloszilloskop-Spezifikationen zur Analyse und Fehlerbehebung bei der Signalintegrität.

Moderne DSOs lösen diese Abtastrateneffekte, indem sie mit der drei- bis fünffachen Oszilloskopbandbreite abtasten, und zwar auf mehreren Kanälen gleichzeitig. Dadurch werden selbst bei der Verwendung aller Kanäle genügend Abtastpunkte sichergestellt. Die höchste derzeit verfügbare Einzelschuss-Signalerfassungsrate eines Digitaloszilloskops beträgt 20 GS/s auf jedem Kanal.

# Warum ist dies so wichtig?

Stellen wir uns einmal vor, wir würden einen Prüfpunkt über einen Tastkopf mit einem konventionellen DSO messen, das zwar über eine hohe Abtastrate verfügt, diese bei der Verwendung mehrerer Eingänge aber nicht aufrechterhalten kann. Bei Anschluss des ersten Prüfpunkts liegt die Anstiegszeit der

Signalflanke klar und deutlich ablesbar bei z.B. 400 ps. Wird der zweite Eingang mit dem Signal des zweiten Prüfpunkts aktiviert, weisen beide Signale in der Darstellung eine höhere Anstiegszeit und mehr Verzerrungen auf. Dies liegt daran, dass sich die Abtastrate halbiert hat und nun ungenügend ist. So kann das Oszilloskop die Flankenanstiegszeit von 400 ps nicht präzise erfassen. Merke: Eine Erfassung mit ungenügender Abtastrate täuscht zusätzliche Verzerrungen und eine längere Anstiegszeit vor. Diese ungenaue und irreführende Signalrekonstruktion wird als Aliasing bezeichnet. Der beste Weg zur Vermeidung von Aliasing besteht darin, ein Messgerät mit voller Einzelschuss-Abtastrate für alle verwendeten Kanäle einzusetzen.

Die Triggerfunktionen sind hier genauso ausschlaggebend wie beim Logikanalysator. Denn wie beim Logikanalysator dient auch hier der Trigger als Beweis dafür, dass eine bestimmte Art von Ereignis aufgetreten ist. Die Triggerung beim DSO/DPO unterscheidet sich allerdings insofern, als dass hierbei die Möglichkeit zum Erkennen von und zum Reagieren auf eine Vielzahl analoger Ereignisse besteht:

 Flankenpegel- und Anstiegsgeschwindigkeits-Bedingungen

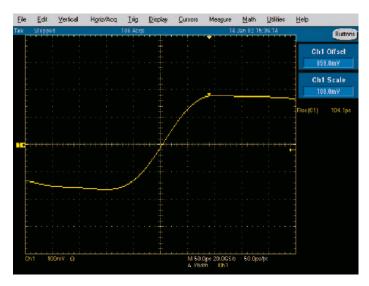


Bild 7: Darstellung einer Flanke mit einer tatsächlichen Anstiegszeit von 85 ps auf einem 6-GHz-DPO

- Pulscharakteristika einschließlich Glitches, Ereignisse mit niedriger Amplitude und Bedingungen mit gleicher Breite
- Verletzungen der Setup-and-Hold-Zeit
- serielle digitale Hochgeschwindigkeits-Bitmuster

All diese Triggerarten können Ingenieuren zunächst beim Erkennen und später beim Analysieren von Problemen mit der Signalintegrität helfen. Es gibt auch verschiedene Kombinationen aus Spannung-, Timingund Logiktriggern sowie Spezialtrigger.

## Tastkopflösungen für Oszilloskope

Noch wichtiger als der Logikanalysator-Tastkopf ist der Oszilloskop-Tastkopf, der möglichst die volle Bandbreite des Messgeräts an den Prüfpunkt bringen soll. Doch jeder Tastkopf besitzt in erster Linie einen Widerstand und eine Kapazität. Die daraus resultierende Last kann die Messergebnisse verfälschen. In Bild 5 sieht man die Belastungseffekte des Tastkopfes bei einem typischen Hochgeschwindigkeitssignal (erdbezogener 250-mV-Schritt mit einer Anstiegszeit von ~200 ps). Der Bildschirm zeigt dasselbe Signal - mit und ohne Last auf einem 4-GHz-Oszilloskop. Durch den

Tastkopf wurde das System mit dem Originalsignal (weißer Kurvenzug) wie durch den grünen Kurvenzug dargestellt belastet und dadurch in der Scope-Darstellung die vordere Kurvenkante etwas verschliffen.

Die Tastkopf-Eingangscharakteristika können tatsächlich Probleme beim Messen der Signalintegrität hervorrufen. Man könnte beispielsweise glauben, dass der Bus selbst zu einer Verschlechterung der Anstiegszeit führt und Logikfehler verursacht. Durch Umschaltung auf einen Tastkopf mit niedrigerer Kapazität wird dann deutlich, dass die Anstiegszeit durch den Bus gar nicht beeinträchtigt wird. Der Logikfehler entsteht durch das Messen mit dem Tastkopf!

Eine neue Generation von Oszilloskop-Tastköpfen mit extrem niedriger Kapazität ist die Antwort auf diese Probleme bei Hochgeschwindigkeitsmessungen. Mit einer Bandbreite von 6 GHz, sehr kurzen Tastkopfspitzen-Leitungslängen und einer Eingangskapazität unter 0,5 pF bewahren diese neuen Tastköpfe die Integrität des Signals wesentlich besser. Nur ein Tastkopf mit niedriger Kapazität und äußerst kurzer Tastkopfspitzen- und Masseleitungslänge ist ein Garant dafür, dass die Bandbreite des Oszilloskops nicht ungenutzt bleibt.

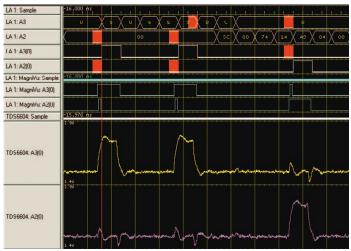


Bild 8: Übersprecheffekte können mithilfe von zeitkorrelierten digitalen und analogen Darstellungen auf demselben Bildschirm schnell ermittelt werden

Weiter sei auf die Beziehung zwischen der Eigenanstiegszeit eines Systems und seiner Bandbreite hingewiesen. Falls die Übertragungskurve die eines einfachen RC-Tiefpasses ist, wie bei allen analogen Scopes der Fall, gilt: Anstiegszeit = 0,35/ Bandbreite. ein solches System mit 3,5 GHz Bandbreite hätte also eine Anstiegszeit von 100 ps, gemessene Signale müssen deutlich geringere Anstiegszeiten haben, um korrekt abgebildet zu werden. Bei digitalen Scopes ist diese Beziehung nur ein grobes Richtmaß, man konsultiert die Unterlagen bzw. ermittle das Kleinsignal-Übertragungsverhalten experimentell.

Um das Thema Bandbreite und Sprungantwort zu verdeutlichen, bringen die Bilder 6 und 7 die Ergebnisse realer Messungen, die bestätigen, dass die Bandbreite die angezeigten Ergebnisse in nicht unerhebliche Maße beeinflussen kann. Die Praxis lehrt: Ein Oszilloskop mit einer Bandbreite, die das Drei- bis Fünffache der höchsten vorkommenden Messfrequenz beträgt, ist das richtige Messgerät zur Fehlerbehebung in Sachen Signalintegrität.

### Integrierte Logikanalysatoren und Oszilloskope

Sowohl der Logikanalysator als auch das DSO sind leistungs-

starke Messmittel zur Fehlerbehebung bei Signalintegritätsproblemen. Durch die neusten Fortschritte bei der Integration konnte die Leistung dieser beiden Einzelgeräte um ein Vielfaches gesteigert werden. Neue integrierte Tools ermöglichen den Anschluss eines DSOs (das den analogen Bandbreiteanforderungen des Messobjektes entspricht) an einen Logikanalysator (mit entsprechender Kanalzahl, Speichertiefe und Abtastrate), um sowohl den analogen als auch den digitalen Messanforderungen zu entsprechen. Die miteinander verbundenen Messgeräte arbeiten dann nahtlos wie eine Einheit. Auf dem Bildschirm des Logikanalysators werden sowohl die digitalen Größen als auch die vom Oszilloskop aufgezeichneten Signale dargestellt, und zwar zeitkorreliert.

Bild 8 zeigt beispielsweise vier verschiedene Ansichten derselben Signale. Die oberen beiden sind 4- bzw. 8-Bit-Bus-Darstellungen. Die nächsten beiden Signale stammen von Signalleitungen, die Teil der beiden Busse sind. Die roten Markierungen kennzeichnen immer die Positionen von Glitches. Die nächsten beiden Kurven zeigen diese Signale mit einer hohen Zeitauflösung, die erkennen lässt, dass die Glitches mit den vorderen Flanken des anderen

Leistungsmerkmal	empfohlen zur Signalintegritätsanalyse
Bandbreite/Anstiegszeit	6 GHz/70 ps Echtzeit, Einzelschuss
Abtastrate	20 GS/s, volle Abtastrate auf mehreren Kanälen
Kanäle	4
Triggerung	Low-Jitter mit Logiktrigger, auf Setup/Hold-Verletzung und serielle Bitmuster
Aufzeichnungslänge	240.000 Punkte (auf mehreren Kanälen gleichzeitig)
Kanal-Deskew (Versatzausgleich)	Fähigkeit zur entsprechenden Anpassung aller Kanaleingänge
Delta Zeitgenauigkeit	1,5 ps effektiv
Tastköpfe	beweglicher 6-GHz-Tastkopf oder HD-Kompressionstastkopf über Logikanalysator
Anzeige	Farbdisplay
Integration	Anzeige der Hochgeschwindigkeits-Oszilloskop-Signale und der Logikanalysator-Signale auf einem Bildschirm
Automation und Analyse	automatische Messlösungen für Jitter, Bus-Standards usw.

Signals zusammenfallen. Die letzten beiden Kurven zeigen die analogen Messungen des Oszilloskops für diese beiden Signalleitungen. Alle Signale sind zeitkorreliert und befinden sich in derselben Ansicht. Daher lässt sich schnell ermitteln, dass bei den beiden Signalleitungen ein Übersprecheffekt vorliegt.

### Jitter-Analyse-Software vereinfacht komplexe Messungen

Auch Jitter kann bei der Systemstabilität eine große Rolle spielen. Jitter entsteht üblicherweise im Taktschaltkreis, kann aber auch durch das Störrauschen eines Netzteils, durch Übersprechen oder Phasenregelkreise verursacht werden. Jitter hat Auswirkungen auf praktisch auf jedes beliebige Signal im System, insbesondere auf die Daten und die Signale auf Adress- und "Enable"-Leitungen. Bei den neuen digitalen Hochgeschwindigkeitsystemen werden Jitter-Messungen zu einer immer größeren Herausforderung. Die heutigen Jitter-Messanforderungen beinhalten Zyklus-zu-Zyklus-Messungen (statt kumulativer Messungen

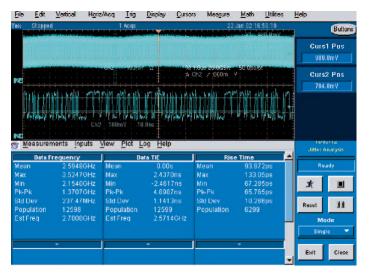


Bild 9: Bildschirmdarstellungen bei einer Jitter-Messung

über mehrere Erfassungen hinweg), Analysen von Timing-Trends, Statistiken mit Histogrammen, Messungen an "Spread-Spectrum"-Takten, Analysen serieller Datenströme und mehr. Hochgeschwindigkeitssignale mit ihren kurzen Anstiegszeiten und kleinen Timing-Grenzen erfordern eine Jitter-Messgenauigkeit im Bereich von 1 pseff. Für diese Höchstleistung benötigt man natürlich ein schnelles, präzises

Oszilloskop. Genauso wichtig ist die Software für Jitter-Messungen. Da Jitter in so vielen Formen auftritt und Jitter-Messungen sich größtenteils auf statistische Berechnungen stützen, ist ein spezielles Jitter-Software-Paket eine gute Lösung.

Die Analysepakete lassen sich in Digitaloszilloskope mit hoher Bandbreite integrieren ermöglicheninnerhalb einer einzigen Erfassung Timing-Messungen an jedem Zyklus. Sie sind weiter in der Lage, über mehrere Erfassungen hinweg statistische Analysedaten zu sammeln. Bild 9 zeigt einen typischen Bildschirm mit einer Jitter-Messung. Die Menüleiste und die Schaltflächen führen den Benutzer durch die einzelnen Messschritte, während die statistischen Ergebnisse in der unteren Fensterhälfte übersichtlich in Tabellenform aufgeführt sind.

Das Oszilloskop sollte natürlich selbst so wenig Jitter wie möglich einstreuen. Bei den meisten Datenübertragungsstandards ist ein Trigger-Jitter im Bereich von 7 ps<sub>eff</sub> erwünscht. Weitere wichtige Charakteristika sind eine Delta-Zeitgenauigkeit im Bereich von 1,5 ps<sub>eff</sub> sowie eine hohe Bandbreite mit Oversampling. Ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 6 GHz und einer Einzelschuss-Abtastrate von 20 GS/s auf mehreren Kanälen erfüllt die entscheidenden Spezifikationen für Hochgeschwindigkeits-Jitter-Messungen an schnellen digitalen Bussen und Geräten.

Fortsetzung im nächsten Heft