3 Das Vertikalsystem – Frontend und Analog-Digital-Converter

Den bedeutendsten Anteil des Umbruchs im zeitlichen Ablauf der Weiterentwicklung hat der Vertikalteil erfahren. Als vergleichbares Pendant für den Umbruch könnte aus der Konsumerelektronik die Entwicklungsgeschichte von der Schallplatte zur CD bzw. DVD angeführt werden. Gleichwohl existieren in der Audiowelt als auch bei der Messtechnik zwei Lager aus jeweils überzeugten Anwendern der digitalen bzw. analogen Technik. Häufig sprechen verstärkt Liebhaber der klassischen Musik der analogen Schallplatte deutlich mehr Wiedergabequalität zu als dem digitalen Medium. Für die analoge Messtechnik, besonders das Oszilloskop, stößt man noch vereinzelt auf vergleichbare Meinungen. Die permanente Weiterentwicklung der digitalen Konzepte ließ das Gewicht der Kritikpunkte deutlich schwinden. Werfen wir zunächst einen kurzen Blick auf die analoge Technik, dem ursprünglichen Start der Entwicklung des Oszilloskops. Viele Geräte der analogen Generation stehen heute noch im Dienst.

3.1 Frontend des analogen Oszilloskops – auch heute ein elementarer Bestandteil des digitalen Konzeptes

In der analogen Technik besteht der Schaltungszug im Wesentlichen aus einem Abschwächer und einigen Verstärkerstufen, die das zu messende Signal so aufbereiten, dass damit direkt das Vertikalablenksystem der Bildröhre angesteuert werden kann. Bild 3-1 zeigt den stark vereinfachten Blockschaltbildauszug eines analogen Gerätes. Die zum Vertikalsystem zugehörigen Blöcke sind gelb unterlegt.

Der Abschwächer reduziert die am Messeingang anliegende Spannung auf das entsprechend benötigte Maß für die nachfolgenden Verstärkerstufen. Beide Komponenten zusammen werden auch als Frontend bezeichnet. Bei niedrigen Signalspannungen beträgt die Dämpfung des Abschwächers 0 dB, weitere Variation erfolgt durch die Verstärkungseinstellung. Die Anforderungen an die Verstärker sind hoch. Zunächst soll der Frequenzgang über einen weiten Bereich linear sein. Weiterhin ist sowohl Gleichspannung als auch Wechselspannung (eventuell bis in den GHz-Bereich) in konstanter Qualität zu verarbeiten. Der Verstärkungsfaktor orientiert sich an der notwendigen Ablenkspannung für die eingesetzte Bildröhre, sie liegt im Bereich von ca. 10 V/cm, während das zu messende Signal im einstelligen mV-Bereich liegen kann.

Als Qualitätsmerkmal für den vertikalen (Verstärker) schaltungszug hat sich vor Jahrzehnten die Angabe der 3-dB-Bandbreite etabliert. Sie gibt an, bei welcher Fre-

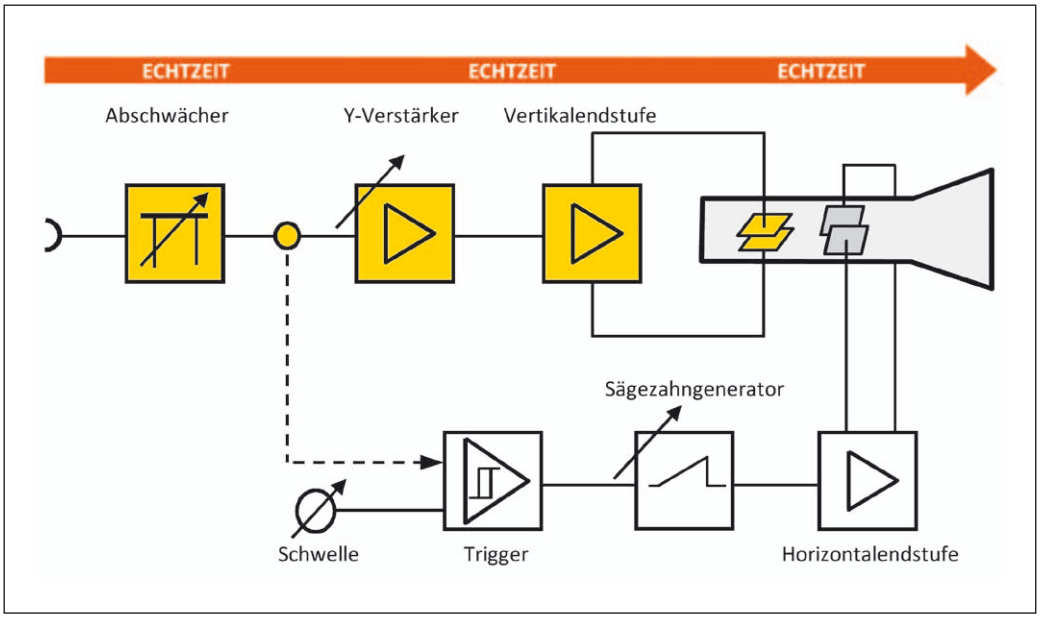

Bild 3-1 Grundkomponenten des analogen Vertikalsystems

Das Vertikalsystem – Frontend und Analog-Digital-Converter

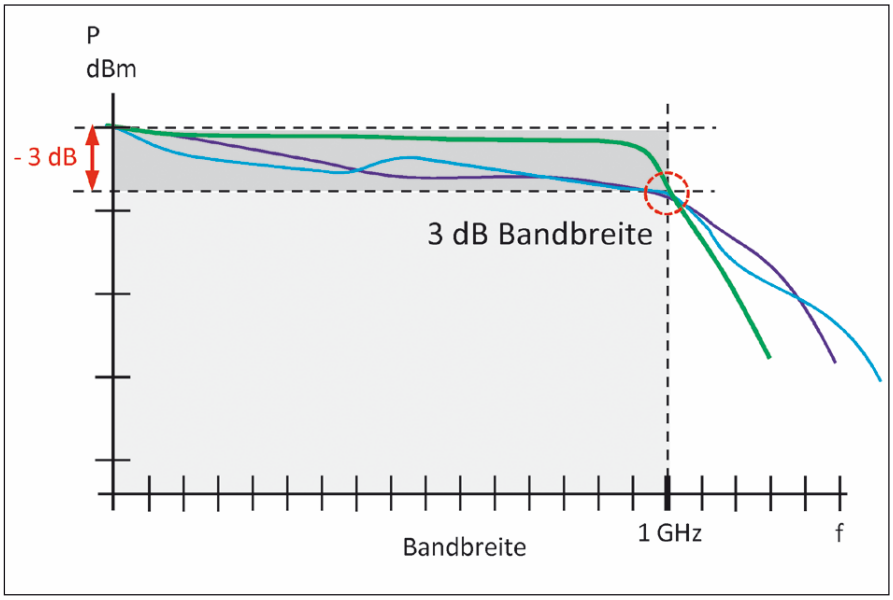

Bild 3-2 Alle Kurven erfüllen die Angabe -3dB bei 1 GHz

quenz eines pegelkonstanten und sinusförmigen Eingangssignals die vertikale Auslenkung um 3 dB (Faktor der Spannung 0.707) abgenommen hat. Auf den ersten Blick erscheint dieser Parameter als durchaus aussagekräftig. Doch der Schein trügt, denn diese punktuelle Definition besagt nichts über den Verlauf der Verstärkerkurve auf dem Weg zu diesem Punkt.

Bild 3-2 zeigt Kurvenverläufe, die alle der Angabe -3dB bei der Frequenz von 1 GHz entsprechen.

Die grüne Kurve stellt den im Frequenzgang qualitativ höchstwertigen Verstärkerzug dar. Möchte man wissen, wie diese Kurve bei einem vorhandenen Oszilloskop ausfällt, so kann diese mit einem Sinusgenerator leicht selbst ermittelt werden. Näheres dazu im Kapitel 7, Praxis-Demonstrationen. Diese Untersuchung dient nicht nur der Qualitätsbeurteilung beim Kauf, sondern auch zur Kontrolle, ob das verwendete Gerät noch fehlerfrei arbeitet.

Mit steigendem Frequenzgang bzw. höher anzusetzender Grenzfrequenzen moderner Oszilloskope wurde ein weiterer Parameter des Messeingangs zum Fokus, die Eingangsimpedanz. Zunächst unabhängig vom Tastkopf, dem separate Kapitel gewidmet sind, wird der Eingang des Oszilloskops meist mit einem realen Widerstand von 1 MOhm gefertigt. Zusätzlich erfolgt die Angabe der Kapazität des Eingangs, die bei wenigen Picofarad liegt. Im Bereich höherer Frequenzen wird, sofern der Oszilloskopeingang direkt mit dem Messobjekt verbunden ist, zunehmend der Effekt der Leitungstransformation in den Vordergrund rücken, was zur Folge hat, dass am Messeingang des Oszilloskops ganz andere Spannungs- und Phasenverhältnisse herrschen, als an der Messspitze des Tastkopfes, sprich an der zu untersuchenden Schaltung selbst. Besonders in 50-Ohm-Systemen der HF-Technik ist dieser Effekt ständig präsent. Für die Welt der HF-Technik ist deshalb der 50-Ohm-Eingang unabdingbar. Und nicht nur dort, selbst in der Digitaltechnik wird man mit immer steileren Anstiegsflanken und höheren Taktfrequenzen konfrontiert. Eine korrekte Darstellung des Signalverlaufs ist nur zu erreichen, wenn die Anpassung zwischen Messobjekt und Messgerät stimmt. Das ist oft nur mit entsprechend konstruierten Tastköpfen zu erreichen. Die Auswirkungen von Fehlanpassungen bei Messungen steiler Flanken werden im Kapitel 7, Praxis-Demonstrationen noch anschaulich dargestellt.

Damit sind die wesentlichen Eigenschaften für den Vertikalteil des analogen Oszilloskops beschrieben. Für die Messaufgabe ist die Kenntnis der -3 dB Grenze der Bandbreite relevant, die Empfindlichkeit – wo liegt die Grenze der vertikalen Auflösung des Oszilloskops - ergibt sich überschlägig aus der kleinsten Y-Einstellung z.B. 10 mV/Div. Diese Angabe berücksichtigt natürlich nicht das noch im Detail beschriebene Eigenrauschen und den damit verbundenen Signalrauschabstand. Die Bandbreite bzw. Grenzfrequenz des Geräts ist anhand der -3 dB Angabe im Datenblatt erkennbar. Mehr war seither aus Sicht der Vertikaleinstellung nicht zu berücksichtigen, wenn man die Qualitätsanforderungen an die Verstärkerstufen bzgl. Verzerrungen und Rauschen einmal außen vor lässt.

Der Signalrauschabstand (SNR) des analogen Frontends tritt bei Bandbreiten von 10 MHz oder 100 MHz und einem Vertikalbereich von 10 mV/Div kaum als gewichtiges Beurteilungskriterium auf, für diese Eckwerte sind rein konstruktiv ordentliche Ergebnisse erreichbar.

Anders beim digitalen Konzept: Der ADC trägt kräftig zum Rauschaufkommen bei, womit sich der Fokus beim Frontend auf das Zusammenspiel von SNR mit dem ADC unter wesentlich gesteigerten Bandbreiten ausrichtet, das zentrale Thema der nun folgenden Abschnitte.

Ein signifikanter Unterschied zwischen digitalem und analogen Konzept: Das am Eingang des analogen Vertikalsystems anliegende Messssignal wird quasi ohne Zeitverzögerung und in seinem individuellen und kontinuierlichen Verlauf über das Ablenksystem der Bildröhre und dem Elektronenstrahl unmittelbar auf dem Bildschirm ausgegeben.

Diese Aussage steht nicht grundlos an dieser Stelle, sie deutet übergreifend auf eine wesentliche Eigenschaft der analogen Technik hin, auf welche wir später noch zurückkommen werden.

3.2 Frontend des digitalen Oszilloskops

Das aktuell realisierte Frontend kann in drei Hauptkomponenten aufgeteilt werden: Abschwächer, Verstärker sowie (Alias)Filter und Analog-Digital-Converter (ADC). Die ersten beiden Teilkomponenten (Abschwächer, Verstärker) sind funktionell identisch zum analogen Oszilloskop (Bild 3-3). Auch im analogen Konzept findet man ggf. ein Filter, um wahlweise die Gesamtbandbreite einzuschränken, was den Signalrauschabstand verbessert. Das Aliasfilter hingegen ist ausschließlich für die analog-digital Wandlung erforderlich, es verhindert das Entstehen von Aliasen, die durch Frequenzanteile im Eingangssignal hervorgerufen werden, die höher als die halbe ADC-Abtastrate liegen (Nyquistbedingung).

Für die Betrachtung von Rauschen und Verzerrungen ist der Verstärker von besonderer Bedeutung. Wie jeder andere Verstärker produziert auch dieser unerwünschte Signale. Es ist nicht gerade trivial, einen Verstärker mit hoher Linearität und geringsten Verzerrungen für eine Bandbreite von DC (!) durchgängig bis in den einstelligen GHz-Bereich zu konstruieren.

Beide Hauptkomponenten, Verstärker und ADC, produzieren Rauschen und Verzerrungen, die sich zu einem „Gesamtrauschpegel“ summieren und dessen Ursache nicht im ursprünglichen Messsignal zu finden ist, sondern vom Messgerät selbst intern hinzugefügt wird. Klar ist, dass alle Bestrebungen dahingehend sind, diese unerwünschten Rauschprodukte auf ein geringstmögliches Maß zu drücken.

Das bedeutet auch, dass die Hauptkomponenten gegenseitig sehr fein aufeinander abgestimmt sein müssen. Es ist sinnlos, den Verstärker grenzenlos auf z.B. minimalstes Rauschen zu trimmen, während der ADC gleichzeitig mit hohem Rauschanteil dominiert oder umgekehrt. Dieses Beispiel zeigt, wie wir später noch erfahren werden, dass bei bestimmten Konstellationen und Geräteeinstellungen die erwarteten Verbesserungen bei der Signaldarstellung ausbleiben werden, weil ein anderer Schaltungsteil die Dominanz des unerwünschten Rauschpegels übernommen hat.

Zur Beurteilung des analogen Teils des Frontend (Verstärker) wird ein speziell definiertes Signalrauschverhältnis herangezogen, der SFDR –Spurious free dynamic range.

SFDR setzt das Nutzsignal (reiner Sinus) ins Verhältnis mit den Spitzenwerten der Nebenwellen (Harmonische höherer Ordnung). Der Wert wird unter einer definierten Bandbreite ermittelt, er kann in dBc (Carrier) oder dBFS (full Scale) angegeben werden. Ein Beispiel für eine Datenblattangabe könnte wie folgt aussehen:

56-44 dBFS @ 4 GHz, FS 50 mV/Div

Die im SFDR beinhalteten unerwünschten Rauschanteile stellen einen Bestandteil des noch zu behandelnden SINAD-Wertes dar, er ist wiederum für die nachfolgende Berechnung des ENOB notwendig.

Nach der Verstärkung folgt die elementare Veränderung gegenüber dem ursprünglichen analogen Konzept des Frontends, der Analog-Digital-Converter (ADC), der nun im Detail betrachtet werden soll. Hierzu ist es erforderlich, etwas tiefer in die Eigenschaften des ADC

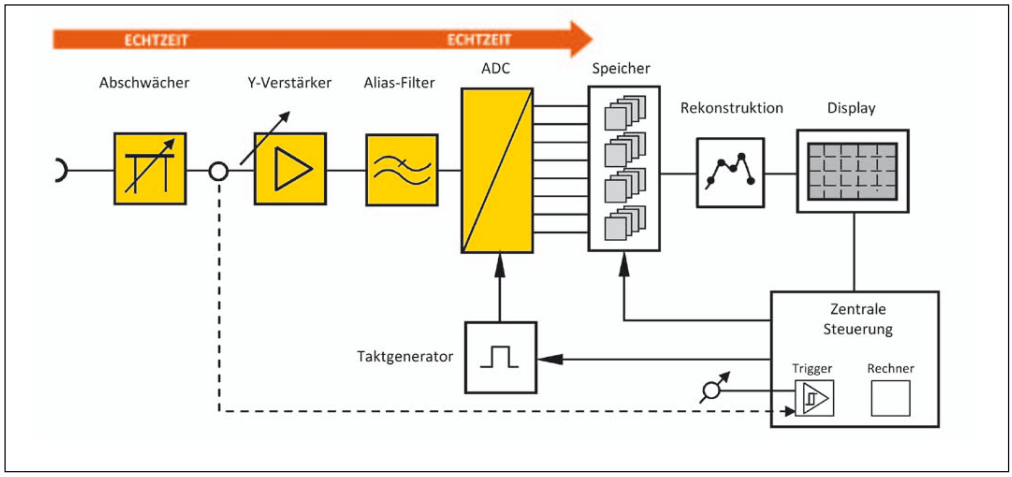

Bild 3-3 Grundkomponenten des digitalen Vertikalsystems

Das Vertikalsystem – Frontend und Analog-Digital-Converter

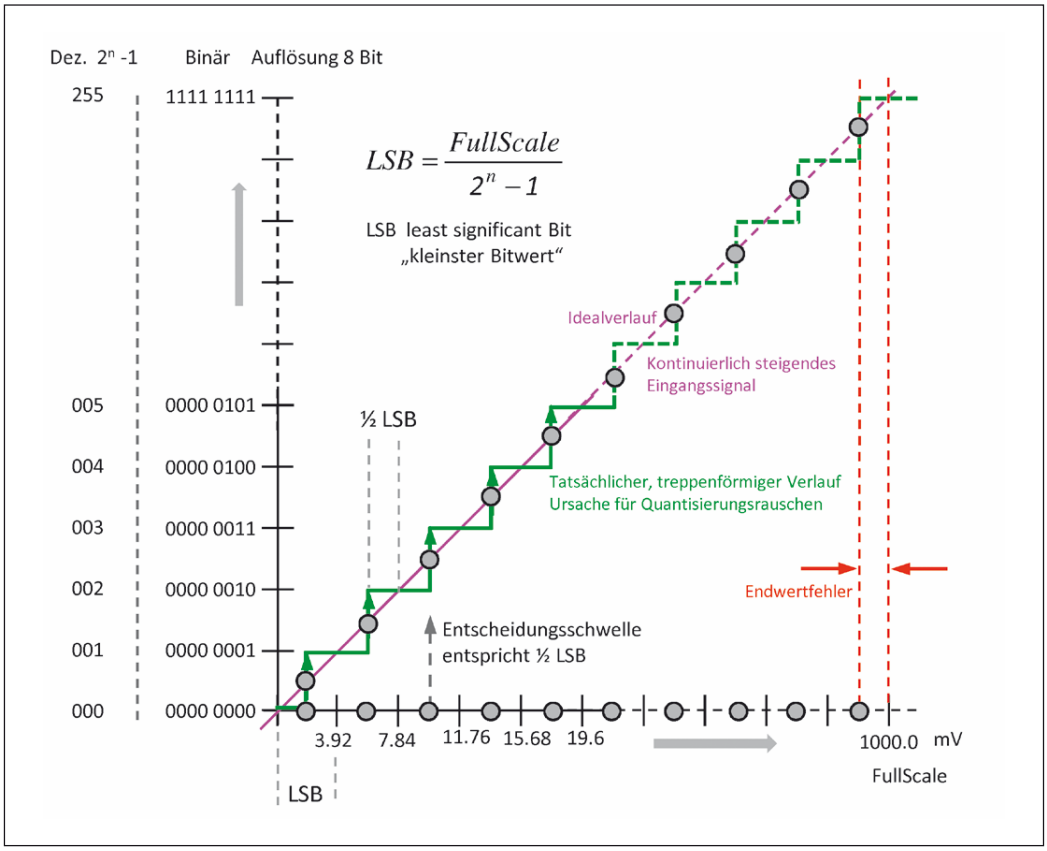

Bild 3-4 Eingang/ Ausgang des ADC - Verlauf der Digitalisierung

einzusteigen, womit, bis auf eine Ausnahme, nicht beabsichtigt ist, die Funktion verschiedener Wandlerarchitekturen, wie z.B. sukzessive Approximation (SAR) oder Flash-Converter zu behandeln. Vielmehr ist es interessant, das Ergebnis der Digitalisierung an seinem Ausgang zu betrachten, wobei besonders das Thema Rauschen und Verzerrungen einen bedeutenden Stellenwert einnehmen.

3.3 Der Grundprozess der Analog-Digital-Wandlung

Im Bereich der Oszilloskope hat sich bei den ADCs eine Nennauflösung von 8 Bit etabliert. Das mag überraschen, sollte man doch annehmen, dass hier die Regel gelten könnte, je höher die Auflösung umso genauer, empfindlicher - kurzum - einfach besser. Die dazu relevanten Randbedingungen werden wir im Detail erarbeiten.

Nehmen wir zunächst einen ADC mit 8 Bit Nennauflösung und betrachten die sich am Ausgang einstellende Stufung eines linear ansteigenden Testsignals, das den gesamten Arbeitsbereich, z.B. von 0 mV bis 1000 mV kontinuierlich durchläuft.

Bild 3-4 zeigt den angenommenen Verlauf des analog vorliegenden Eingangssignals als Gerade (magenta). Die 8 Bit Auflösung ermöglicht bekanntlich eine Aufteilung in 255 Stufen.

Wir erhalten am Ausgang ein entsprechendes Bitmuster, das auf der linken Diagrammseite in dezimaler und binärer Form skaliert aufgezeichnet wurde.

Allgemein betrachtet wird jede Digitalisierung am Ausgang ein treppenförmiges Ergebnis abliefern. Diese Treppenform ist unabhängig von der Ausführung der inneren Architektur und der binären Codierung, die am Ausgang vorgesehen ist. Pro Stufe steigert sich der Wert im Beispiel um 3.92 mV bei einem festgelegten Endwert (FullScale) von 1000 mV. Der niedrigste Wert der Auflösung beträgt also 3.92 mV, auch als LSB (least signifikant Bit), „niedrigster Bitwert“ benannt. Die „Entscheidungsschwelle“, und damit ab welcher Veränderung des Eingangssignals der Sprung auf den nächsten Digitalwert erfolgt beträgt ½ LSB. Da das Teilverhältnis (255) nicht voll aufgeht, bleibt ein Rest, der als Endwertfehler im Bild gekennzeichnet ist. Das ist einer von den Fehlern, die bei der Digitalisierung auftreten, mit weiteren werden wir uns im nächsten Abschnitt beschäftigen