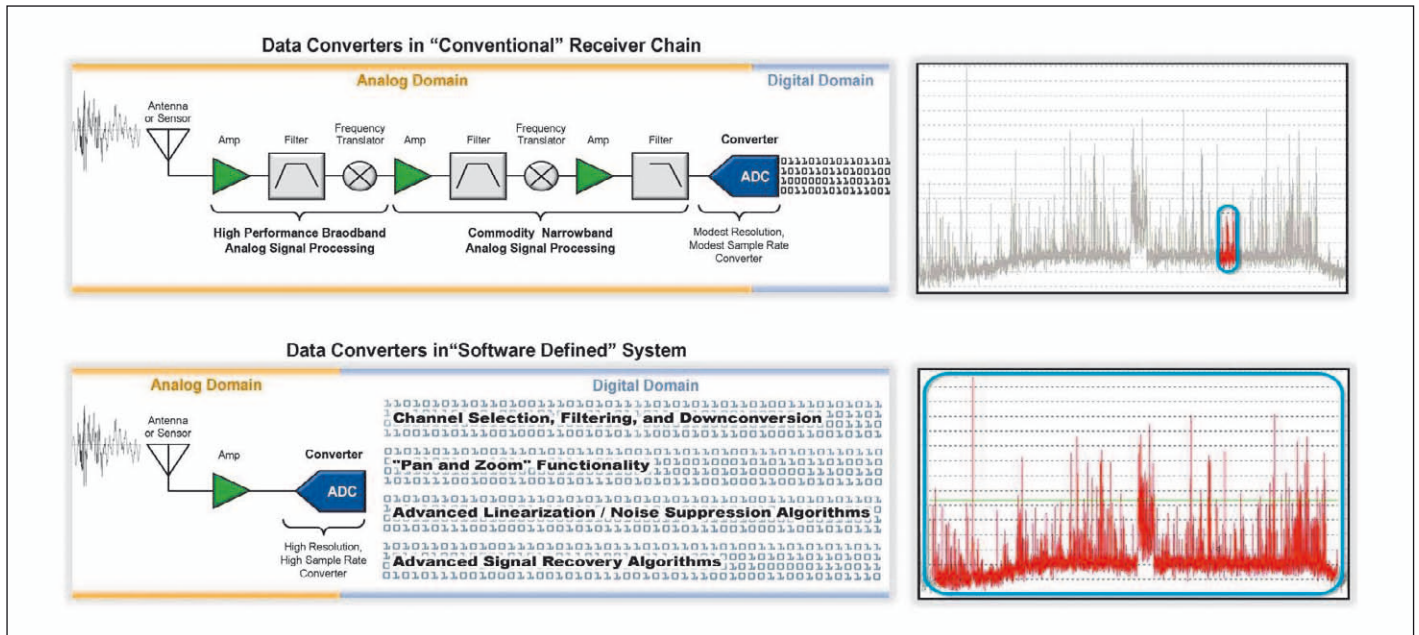


# Highspeed-Datenwandler im Überblick



## Das „Was, Warum und Wie“ von Highspeed-Datenkonvertern erklärt hier David Robertson, Vizepräsident von Analog Devices.

Als das Gateway zwischen der „realen Welt“, in welcher die Vorgänge analog ablaufen, und der digitalen Welt der Nullen und Einsen sind Datenkonverter kritische Elemente in der modernen Signalverarbeitung. Im Laufe der letzten drei Jahrzehnte haben es unzählige Innovationen bei der Datenkonversion ermöglicht, die Performance und die Architektur zu verbessern und diese Fortschritte in jeder Beziehung vom ursprünglichen medizinischen Anwendungsbereich zur zellularen Kommunikation,

zum Konsumentenbereich mit Audio und Video und zu anderen Anwendungsgebieten zu transformieren. Dort trugen sie dazu bei, vielfältige, vollständig neue Applikationen zu ermöglichen.

Die kontinuierliche Expansion von Breitbandkommunikation und High-Performance-Bildanwendungen hat zu einer teilweisen Ausweitung der Highspeed-Datenkonversion geführt; diese Konverter sind nun in der Lage, Signale mit Bandbreiten ab 10 MHz bis mehr als 1 GHz zu verarbeiten. Ein gewisses Spektrum von Konverterarchitekturen wird gegenwärtig genutzt, um diese hohen Geschwindigkeiten zu erreichen, doch jede Architektur hat ihre speziellen Vorzüge. Dabei bestehen jedoch zwischen analogem und digitalem Bereich einige unterschiedliche Zielvorstellungen bezüglich der Signalintegrität – nicht nur beim analogen Signal, sondern auch beim Takt- und produzierten Datensignal. Diese Problematik zu verstehen, ist nicht nur wegen der richtigen Auswahl der Komponenten wichtig, sondern auch und besonders wegen ihres Einflusses auf die gesamte Systemarchitektur.

## Schneller, schneller, schneller...

In vielen technologischen Bereichen sind die zu verzeichnenden Fortschritte aufgrund der schnelleren Datenübertragung und -verarbeitung entstanden. Dies betrifft z.B. die Verlagerung der Kommunikation vom Ethernet zum WLAN und zum Zellularbereich. Mikroprozessoren, digitale Signalprozessoren und FPGAs haben sich substantiell vor allem durch die Fortschritte in der Höhe der Taktaten weiterentwickelt. Diese Steigerungen wurden primär durch Schrumpfungen bei der Prozesslithographie möglich, sprich kleinere Transistoren, die infolge kleinerer Parasiten schneller schalten können, und das bei geringerer Leistung. Diese Dynamik hat nun eine Umgebung von exponentiell sich vergrößernder Verarbeitungsleistung und Bandbreiten entstehen lassen. Man kann von leistungsstarken digitalen Maschinchen sprechen, die einen wiederum exponentiell gestiegenen „Appetit“ auf Signale und Daten hervorgerufen haben: von stehenden Bildern über Videoanwendungen zum Breitbandspektrum, sei es drahtgebunden oder drahtlos. Ein Prozessor, der mit

100 MHz getaktet wird, ist in der Lage, effektiv Signale mit 1 bis 10 MHz Bandbreite auf jede gewünschte Art zu verarbeiten. Und Prozessoren mit Taktraten von einigen GHz machen das mit Signalen mit Bandbreiten von hunderten von MHz.

Die erhöhte Verarbeitungsleistung und Geschwindigkeit führt natürlicherweise zu einer schnelleren Daten-Conversion: Breitbandige Signale erweitern ihre Bandbreiten (oft bis an die Grenze, welche die Physik oder die Auftraggeber setzen), bildgebende Systeme streben den Umgang mit mehr Pixels pro Sekunde an, um hochaufgelöste Bilder schneller zu liefern. Systeme werden re-designed, um in den Genuss der Vorteile dieser extrem hohen Leistung zu gelangen, dabei spielt der Trend zur parallelen Verarbeitung eine Rolle (Multikanal-Datenkonverter).

Eine andere bedeutsame Architekturveränderung steckt in dem Trend hin zu Multicarrier/Multichannel-Betrieb oder gerade auch software-definierten Systemen. Konventionelle, von Analogtechnik dominierte Systeme erledigen viel von der Signalkonditionierung (filtern, verstärken, mischen) im analogen Bereich;

Quelle:

David Robertson:  
*High Speed Converters: An Overview of What, Why, and How, Technical Article MS-2629, Analog Devices, www.analog.com*  
 übersetzt von FS

das Signal wird erst dann digitalisiert, wenn es auf diese Weise sorgfältig „behandelt“ wurde. Als Beispiel sei ein FM-Radio genannt: Das Signal einer ausgewählten Station in einem 200 kHz breiten Kanal zwischen 88 und 108 MHz wird auf eine Zwischenfrequenz von 10,7 MHz herabgemischt, gegenüber allen anderen Signalen gefiltert und dann auf die für die Demodulation optimale Größe verstärkt. Eine Multicarrier-Architektur digitalisiert bereits das 20 MHz breite FM-Band, und digitale Signalverarbeitung wird genutzt, um die gewünschte Station auszuwählen.

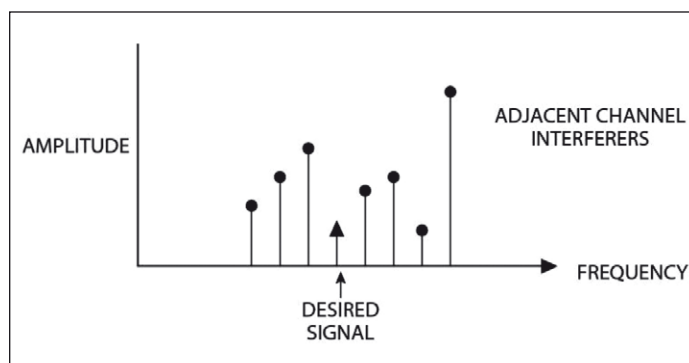
Während die Multicarrier-Lösung viel mehr anspruchsvolle Bausteine und Baustufen benötigt, bietet sie auch einige großartige Systemvorteile: Das System kann mehrere Stationen gleichzeitig (simultan) empfangen und demodulieren, einschließlich AM-basierter Stationen (mit Seitenbändern). Wenn es sorgfältig designed ist, dann kann ein Multicarrier-System durch die Software rekonfiguriert werden, um eventuelle neue Standards zu unterstützen (beispielsweise die neuen HD-Radiostationen, welche auf Seitenbändern basieren). Die ultimative Erweiterung dieses Ansatzes besteht darin, einen breitbandigen Digitizer zu haben, der all diese Bänder verarbeiten kann, und eine kraftvollen Prozessor, der jede Art von Signal entschlüsseln kann: Dies ist im Grunde ein softwaredefinierter Empfänger. Es gibt äquivalente Architekturen in verschiedenen Anwendungsbereichen, wie software-definierte Messinstrumente, software-definierte Kameras etc. Man kann sich dies als Signalverarbeitung im Sinne einer Virtualisation vorstellen. Die zu diesem Konzept einer flexiblen Architektur gehörende Hardware ist eine leistungsfähige digitale Signalverarbeitung und eine Highspeed/High-Performance-Datenkonversion.

## Bandbreite und Dynamikbereich

Die fundamentalen Dimensionen der Signalverarbeitung, sowohl analog als auch digital, sind Bandbreite und Dynamikbereich – diese beiden Faktoren bestimmen, wie viele Informationen ein System aktuell verarbeiten bzw. bieten kann. Daher nutzte Claude Shannons Theorem auch diese beiden Dimensionen, um das grundsätzliche theoretische Limit zu beschreiben, wie viele Information in einem Kommunikationskanal transportiert werden können. Aber diese Prinzipien unterliegen gewissen Regeln und Bedingungen. Bei einem bildgebenden System beispielsweise bestimmt die Bandbreite, wie viele Pixel pro Zeiteinheit verarbeitet werden können, und der Dynamikbereich legt die Intensität oder den Farbbereich zwischen der schwächsten noch wahrnehmbaren Lichtquelle und dem Punkt fest, an dem die Pixels in die Sättigung geraten.

Die nutzbare Bandbreite eines Datenkonverters hat ein fundamentales theoretisches Limit, gesetzt vom Nyquist-Abtasttheorem. Um ein Signal mit der Bandbreite  $B$  zu verarbeiten oder zu präsentieren, benötigt ein Datenkonverter bekanntlich eine  $2 \times B$  oder mehr entsprechende Abtastrate. (Dieses Gesetz gilt für jeden Fall der Abtastung, also für jedes entsprechende Daten-system, egal ob analog oder digital.) Für praktische Systeme vereinfacht ein gewisses Maß an Überabtastung (Oversampling) das Systemdesign substantiell, daher sind Faktoren von 2,5 bis 3 typisch.

Wie bereits erwähnt, führt die kontinuierliche Vergrößerung der Verarbeitungsleistung zu Systemen, welche in der Lage sind, mit größeren Bandbreiten umzugehen, und die Trends bei den Systemen zeigen in Richtung zellulare Telefonie, leitungsgebundene und drahtlose LANs, Bildverarbeitung und Instrumentation mit jeweils immer mehr Bandbreitenbedarf. Das bedeutet nichts weiter als höhere



Ein Beispiel für eine Mehrfachträger-Situation (Multiple Carriers)

Abtastraten bei den Datenkonvertern.

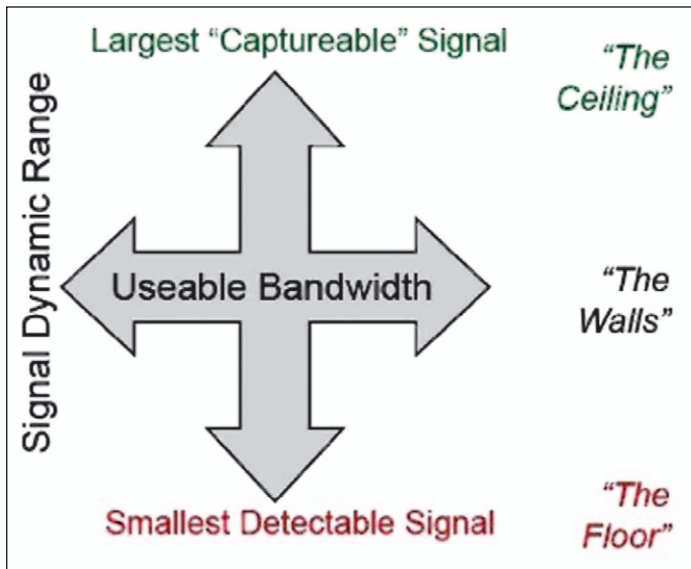
Während die Bandbreiten-Dimension meist intuitiv klar ist, kann die Dimension des Dynamikbereichs etwas weniger offensichtlich sein. Bei der Signalverarbeitung repräsentiert der Dynamikbereich die Spanne zwischen dem größten Signal, welches das System gerade noch verarbeiten kann, ohne dass es in die Sättigung gerät oder Clipping erfolgt, und dem kleinsten Signal, das noch effektiv gelesen werden kann. Man kann sich zwei Arten von Dynamikbereich vorstellen:

**Der Floating Point Dynamic Range** (Fließkomma-Dynamikbereich) könnte sinnvoll sein bei einem Programmable Gain Amplifier (PGA) vor einem gering auflösenden Analog-to-Digital Converter (ADC); man stelle sich etwa einen 4-Bit-PGA vor einem 8-Bit Converter für 12 Bit beim Floating Point Dynamic Range vor. Bei gering eingestellter Verstärkung kann dieses System große Signale ohne Übersteuerung des Konverters aufnehmen. Wenn das Signal hingegen sehr klein ist, wird der PGA auf eine hohe Verstärkung eingestellt. Das Signal könnte eine starke bzw. schwache Radiostation sein oder ein helles bzw. schwaches Pixel in einem Imaging-System. Diese Art, die Dynamik als Floating Point Dynamic Range zu spezifizieren, kann sinnvoll bei konventioneller Signalprocessing-Architekture sein, welche lediglich ein Signal zu einer bestimmten Zeit verarbeitet.

**Der Instantaneous Dynamic Range** (unmittelbare Dynamikbereich) ist aussagekräftiger: Im obigen Arrangement hat das System einen ausreichend großen Dynamikbereich, um gleichzeitig das große Signal ohne Clipping und immer noch das kleine Signal zu verarbeiten – nun benötigt man aber einen 14-Bit-Konverter. Dieses Prinzip findet sich im Zusammenhang mit einer großen Anzahl von Applikationen, wie Empfang von starken und schwachen Radiostationen oder von Mobilfunksignalen oder bei der Bildübertragung. In dem Maße, wie die Systeme anspruchsvollere Signalprocessing-Algorithmen verlangen, geht die Tendenz auch hin zu höheren erforderlichen Dynamikbereichen. Dies erlaubt es dem System dann, mit mehr Signalen umzugehen, falls diese gleich stark sind. Jedes neue Signal benötigt dabei nur 3 dB mehr beim Dynamikbereich, wenn alle anderen Eigenschaften unverändert bleiben. Für die Praxis vielleicht mehr von Bedeutung ist aber, dass, wenn das System mit starken und schwachen Signalen umgehen muss, die Zunahme des Dynamikbereichs wesentlich dramatischer ist.

## Verschiedene Messmöglichkeiten für den Dynamikbereich

Bei der digitalen Signalverarbeitung ist der Schlüsselparameter für den Dynamikbereich die Anzahl der Bits bei der Repräsentation des Signals bzw. die Wortlänge: Ein 32-Bit-Prozessor



**Die fundamentalen Dimensionen der Signalverarbeitung**

hat einen größeren Dynamikbereich als ein 16-Bit-Prozessor. Signale, welche zu groß sind, werden abgeschnitten (Clipping), was eine hochgradig nicht-lineare Arbeitsweise bedeutet, welche die Integrität der meisten Signale zerstört. Signale, die zu schwach sind – weniger als 1 LSB in der Amplitude – werden ignoriert, gehen also verloren. Diese endliche Auflösung wird oft als Quantisierungsfehler oder Quantisierungsrauschen bezeichnet bzw. angesehen und kann ein wichtiger Einflussfaktor für die untere Grenze der Wahrnehmbarkeit sein.

Das Quantisierungsrauschen ist auch ein zu beachtender Faktor in Mixed-Signal-Systemen, jedoch kommt hier noch eine Anzahl von Einflussfaktoren auf den nutzbaren Dynamikbereich von Datenkonvertern hinzu, jeder mit seiner eigenen Spezifikation:

- **Signal-to-Noise Ratio (SNR)**

Dies ist das Verhältnis des gesamten Skalenbereichs (Full Scale) des Konverters zum Gesamtrauschen im Band. Dieses Rauschen kann sich aus Quantisierungsrauschen, unvermeidlichem thermischen Rauschen oder anderen Fehlerquellen, wie z.B. Jitter, zusammensetzen.

- **Statische, differentielle (DNL) und integrale (INL) Nichtlinearität**

Diese Parameter kennzeichnen die Nichtidealitäten in der DC-Übertragungsfunktion des Datenkonverters. (Die DNL bestimmt oft den Dynamikbereich eines Imaging-Systems.)

- **Klirrfaktor (Total Harmonic Distortion, THD)**

Die THD beschreibt statische und dynamische Nichtlinearität, denn durch diese entstehen Harmonische, welche andere Signalanteile überlagern können. Die THD begrenzt häufig den effektiven Dynamikbereich von Audiosystemen.

- **Spurious-Free Dynamic Range (SFDR)**

Der von Nebensignalen bzw. Störsignalen freie Dynamikbereich ist nach oben durch das höchste spektrale Störsignal begrenzt. Dies kann z.B. die zweite oder dritte Harmonische des Taktsignals sein. Nach unten kann die Begrenzung z.B. durch eingeschlepptes 50- oder 100-Hz-Brummen aus der Netzversorgung bestehen. Weil diese Störungen schwache Signale überlagern können, ist der SFDR eine gute Repräsentation des nutzbaren Dynamikbereichs in vielen Kommunikationssystemen.

Es gibt darüber hinaus noch andere Spezifikationen, eigentlich hat jede Applikation ihre eigene optimale Beschreibung des Dynamikbereichs. Die Auflösung des Datenkonverters ist eine gute erste Annäherung an seinen Dynamikbereich, jedoch ist die Wahl der richtigen Spezifikation als wahre Kennzeichnung sehr wichtig. Die Erkenntnis, auf die es ankommt, lautet: Mehr muss nicht besser sein. Da viele Systeme sofort die Notwendigkeit einer größeren Bandbreite bei ihrer Signalverarbeitung eingestehen, können die Auswirkungen auf den Dynamikbereich weniger offensichtlich sein, erfordern aber umso mehr Beachtung.

Wenn auch Bandbreite und Dynamikbereich zwei primäre Kennzeichen bei der Signalverarbeitung sind, so ist es doch nützlich, über einen dritten Parameter nachzudenken. Dies hilft, die Frage „Wie viel wird die extra Performance mich kosten?“ zu beantworten. Wir können an die Kosten in Form des Kaufpreises denken, doch ein mehr technisch orientierter Preis bei Datenkonvertern und anderen elektronischen Baugruppen zur Signalverarbeitung ist der durch den Versorgungsleistungsbedarf entstehende. Leistungsfähigere Systeme – jene mit mehr Bandbreite und höherem Dynamikbereich – tendieren zu höherer Leistungsaufnahme. Ein wirklicher technologischer Fortschritt bringt daher nicht nur mehr Bandbreite und Dynamik, sondern auch weniger DC-Leistungsaufnahme.

**Schlüsselapplikationen**

Wie eben beschrieben, gibt es bei jeder Applikation verschiedene Erfordernisse in Bezug auf die fundamentalen Signalformen, und innerhalb einer vorgegebenen Anwendung kann ein breiter Bereich für Performance-Möglichkeiten bestehen. Man stelle sich beispielsweise eine 1-Megapixel-Kamera gegenüber einer 10-Megapixel-Kamera vor. Das Diagramm ist eine anschauliche Illustration der typischerweise erforderlichen Bandbreite und des

typischen Dynamikbereichs in einer Anzahl verschiedener Applikationen. Die obere Hälfte dieser Darstellung umfasst auch Highspeed-Konverter mit Sampling-Raten von 25 MHz und mehr, welche effektiv Signale in Bandbreiten von 10 MHz und mehr verarbeiten können. Man muss nicht erwähnen, dass dieses Schema nicht statisch ist. Existierende Applikationen können von neuen, leistungsfähigeren Technologien profitieren, um ihre Möglichkeiten zu erweitern und zu verbessern. Jedes Jahr sind unüberschaubar viele neue Applikationen zu beobachten, und viele der neuen Lösungen schieben die Performance-Front weiter nach vorn, ermöglicht besonders durch neue Kombinationen von Highspeed und High-Resolution. Dies bedeutet einen sich ausweitenden Umfang der Konverter-Performance.

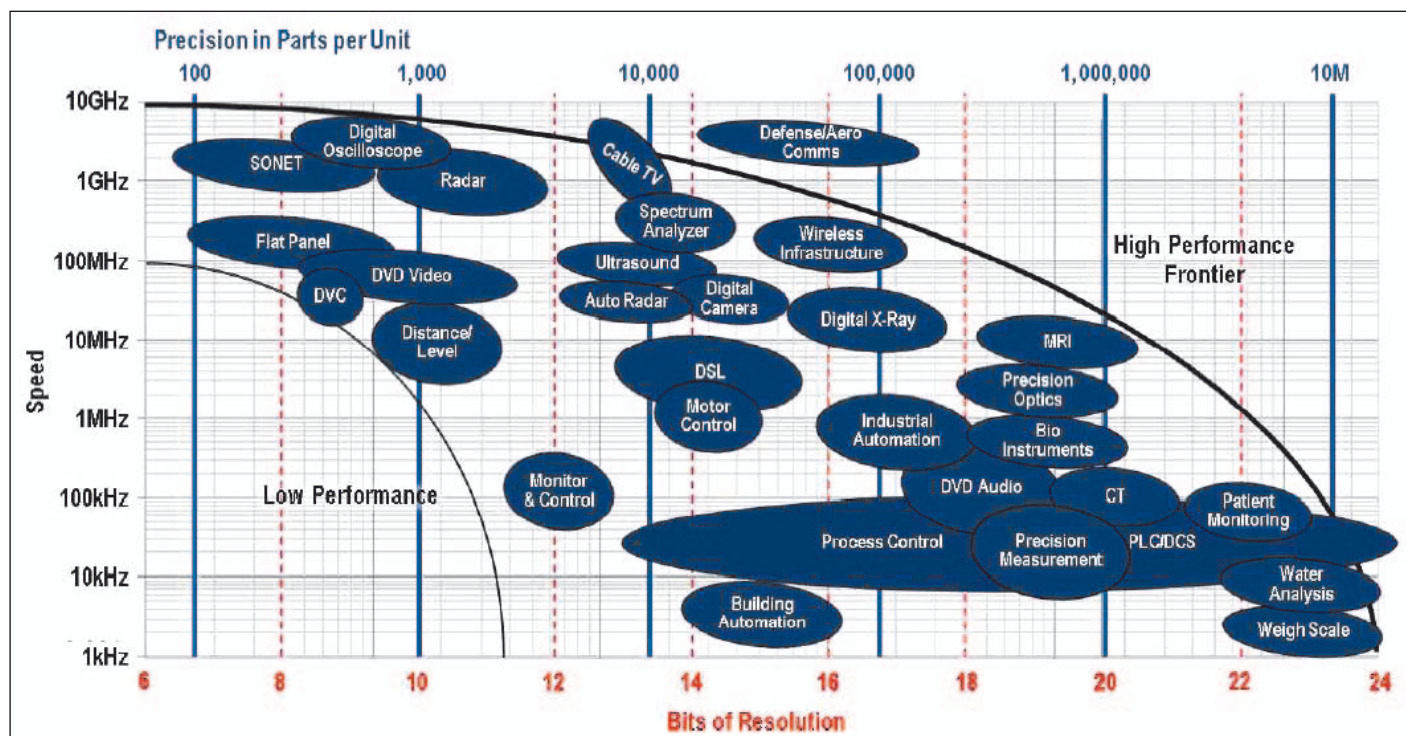
Es ist weiterhin wichtig, daran zu denken, dass die meisten Applikationen kritisch sind in Bezug auf die Versorgungsleistung: Bei portablen bzw. batteriebetriebenen Anwendungen kann die Leistungsaufnahme das primäre technische Beurteilungskriterium sein. Aber auch bei netzversorgten Systemen ist die DC-Leistungsaufnahme der signalverarbeitenden Baugruppen (analog oder digital) ein wichtiges Kriterium, etwa um Abwärme gering zu halten und somit den Einsatz in herausfordernden Umgebungen zu gewährleisten.

**Technologietrends und Innovationen**

Auf die geforderte hohe Geschwindigkeit von Datenkonvertern hat die Industrie mit kontinuierlichen Fortschritten in dieser Technologie geantwortet. Die Neuerungen beruhen auf verschiedenen Faktoren:

- **Prozesstechnologien: Moore's Law & Datenkonverter**

Die Halbleiterindustrie hält einen bemerkenswerten Rekord bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Leistungsfähigkeit der



Einige typische Applikationen, so dargestellt, dass ihre Anforderungen bezüglich Bandbreite (Speed) und Dynamikbereich (Bits of Resolution) erkennbar werden

digitalen Signalverarbeitung. Grundlage sind Fortschritte in der Wafer-Technik in Form immer feinerer lithographischer Strukturen. Tief liegende Sub-micron-CMOS-Transistoren haben viel kleinere Schaltzeiten als ihre Vorgänger, sodass Controller, digitale Prozessoren und FPGAs mit Taktraten im Multi-GHz-Bereich arbeiten können. Mixed-Signal-Schaltkreise wie Datenkonverter können ebenfalls von diesen Lithographie-Fortschritten profitieren, also Moore's Law für sich beanspruchen, um zu höheren Geschwindigkeiten zu gelangen. Aber bei Mixed-Signal-Schaltkreisen gibt es da eine Beschränkung: Mit dem Voranbringen des Lithography-Prozesses entsteht eine Tendenz zur Arbeit an immer geringeren Speisespannungen. Dies bedeutet kleinere mögliche Signalpegel in analogen Schaltungen, sodass es schwieriger wird, hier die Signale in ausreichendem Abstand vom thermischen Rauschflur zu halten. Hier ist also eine erhöhte Geschwindigkeit zum Preis einer reduzierten Dynamik zu konstatieren.

#### • Fortschrittliche Architekturen

Die Fortschritte beim Halbleiter-Herstellungprozess wurden in den letzten 20 Jahren durch verschiedene Innovationswellen bei den Highspeed-Datenkonverter-Architekturen abgerundet und ergänzt. Diese haben mitgeholfen, größere Bandbreiten und höhere Dynamikbereiche mit bemerkenswerter Leistungseffizienz zu verknüpfen. Es gibt eine Anzahl verschiedener Ansätze, die traditionell für Highspeed-Analog-zu-Digital-Konverter genutzt werden, einschließlich der Konzepte Flash, Folding, Interleaved und Pipeline, und diese Herangehensweisen sind nach wie vor sehr populär. Allerdings haben sie sich gewissermaßen mit Architekturen zusammengeschlossen, die traditionell mit Lower-Speed-Applikationen in Verbindung gebracht werden. Hierzu gehören die sukzessive Approximation (Successive Approximation Register (SAR) und das neue Konzept der  $\Delta$ - $\Sigma$ -Konverter, welches kreativ für die Highspeed-Nutzung modifiziert wurde. Jede Architektur

offeriert ihre eigenen Vor- und Nachteile. Für Highspeed DACs tendiert die Architektur zu einer Stromschaltstruktur (Switched Current Mode Structure), welche sich in mannigfaltigen Varianten zeigt. Switched-Capacitor-Ansätze haben beständig ihre Schaltgeschwindigkeit erhöht und sind immer noch partikular populär in Embedded-Highspeed-Applikationen.

#### • Digitale Assistenz (Digitally Assisted Approaches)

Zusätzlich zur Verarbeitungsprozess und Architektur gab es einige beachtliche Innovationen bei der Schaltungstechnik für Highspeed-Datenkonverter über die vergangenen Jahre. Kalibrierungs-Ansätze behaupteten sich über Jahrzehnte hinweg und wurden schließlich in der Weise wichtig, dass sie die Kompensation der Ungenauigkeit der Elemente inhärent in integrierten Schaltungen bewerkstelligten und somit den Schaltkreisen einen höheren Dynamikbereich ermöglichten. Die Kalibrierung wird immer mehr hauptsächlich dort angewandt, wo es um die Beseitigung statischer Feh-

ler geht. Damit können auch dynamische Nichtlinearitäten einschließlich Settling-Fehlern und harmonischen Verzerrungen beseitigt werden.

Auf den Punkt gebracht: Die Innovationen in diesen Bereichen haben den State of the Art bei der Highspeed-Datenkonvertierung substantiell vorangebracht.

#### In Betrieb genommen und angewandt

Die Implementierung eines breitbandigen Mixed-Signal-Systems umfasst mehr als die Auswahl des richtigen Datenwandlers – diese Systeme können nämlich zwingende Auswirkungen auf andere Teile der Signalkette haben. Nochmals: Das Ziel besteht darin, einen guten Dynamikbereich über eine große Bandbreite zu realisieren, indem die Signalverarbeitung möglichst weitgehend digital erfolgt, um die hier möglichen Vorteile zu nutzen.

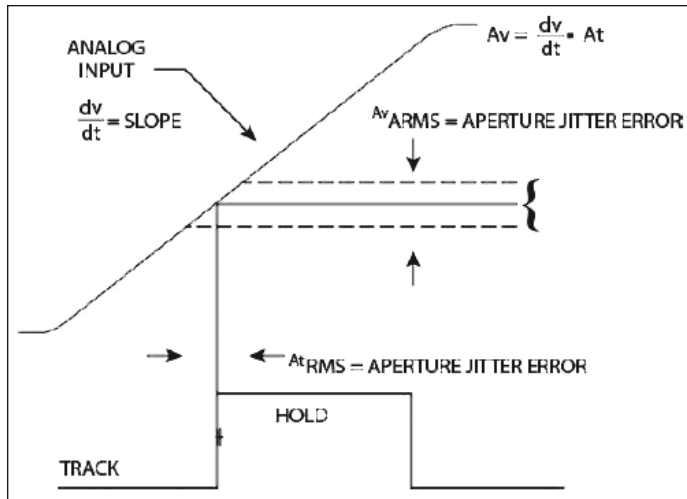
#### • Breitbandige Signalkonditionierung

In konventionellen Systemen mit nur einem Träger (Single Carrier

Systems) muss die Signalkonditionierung, also die Entfernung unerwünschter Signale, so schnell wie möglich erfolgen. Dann erst sollte das Nutzsignal verstärkt werden. Dies erfordert oft selektive Filter, und Schmalbandssysteme. Diese abgestimmten Schaltungen können sehr effektiv sein, wenn es darum geht, eine hohe Verstärkung zu erreichen. In einigen Fällen kann man Frequenzplanungstechniken nutzen, um zu sichern, dass Harmonische oder andere Nebenstörungen aus dem Band fallen. Breitbandssysteme können diese Verfahren nicht nutzen, und so ist es hier oft eine Herausforderung, optimale Störraum und Verstärkung zu kombinieren.

• **Daten-Interfaces**

Konventionelle CMOS Interfaces können Datenraten weit über 100 MHz nicht bewältigen, und Schnittstellen vom Typ Low-Voltages Differential-Swing (LVDS) ermöglichen 800 MHz bis 1 GHz. Für höhere Datenraten kann man Mehrfach-Bus-



**So kann ein Fehler im Taktsignal einen Fehler beim Signal verursachen**

Interfaces nutzen oder SerDes-Interfaces.

Ein Serialisierer/Deserialisierer (SerDes) ist ein Paar aus einem Multiplexer und einem Demultiplexer, die zur seriellen Datenübertragung zwischen zwei parallelen Endpunkten genutzt werden. Zeitgenössische Datenkonverter nutzen SerDes-Interfaces für bis zu 12,5 GS/s (wie

spezifiziert im JESD204B-Standard).

Mehrfach-Data-Lanes lassen sich dabei verwenden, um verschiedene Kombinationen von Auflösung und Geschwindigkeit beim Konverter-Interface zu ermöglichen. Diese Interfaces können allerdings recht anspruchsvoll bezüglich ihrer Einsatzbedingungen sein.

• **Takt-Interface**

Die Verarbeitung von High-speed-Signalen kann sich sehr auf die erforderliche Qualität des Taktsignals im System auswirken. Nichtideale Erscheinungen wie Jitter oder Zeitfehler im Zeitbereich führen zu erhöhtem Rauschen oder Fehlern beim Signal. Für Signalfrequenzen über 100 MHz kann ein Takt-Jitter oder ein Takt-Phasenrauschen einen begrenzenden Faktor beim nutzbarem Dynamikbereich eines Konverters darstellen. High-Performance-Takterzeugungen sind oft erforderlich.

**Schlusswort**

Der Trend hin zu breitbandigeren Signalen und software-definierten Systemen hält an, und die Industrie ist in der Lage, neue Wege zu nutzen, um noch bessere und schnellere Datenwandler herzustellen. Die Fortschritte erfolgen vor allem in den Richtungen Bandbreite, Dynamikbereich und Leistungseffizienz.